

ダイヤモンド中NVセンターを用いた 量子センシング



早瀬潤子

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科
スピントロニクス研究センター



量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～

量子状態の精密制御により従来技術では不可能・不得意だったものが可能に

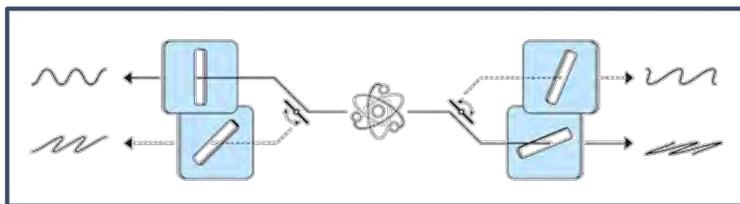
量子コヒーレンスや量子もつれを制御・活用

基礎物理の解明

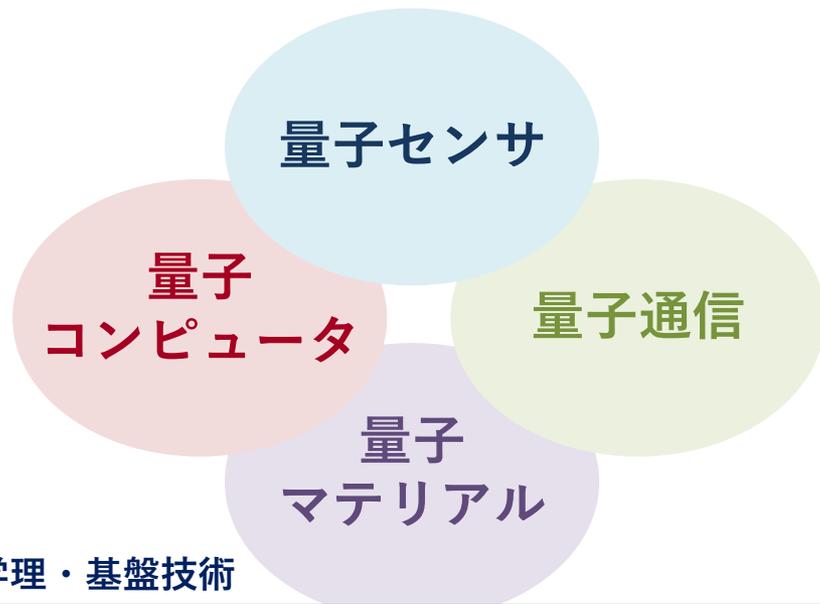
革新的な量子技術の実現

“量子もつれ光子を用いたベルの不等式の破れの実験と量子情報科学の先駆的研究”

2022年 ノーベル物理学賞



ノーベル財団HP



量子力学 量子光学 情報科学
材料・物性 エレクトロニクス
フォトンクス スピントロニクス

量子 2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～

量子状態の精密制御により従来技術では不可能・不得意だったものが可能に

量子コヒーレンスや量子もつれを制御・活用

基礎物理の解明

革新的な量子技術の実現

“量子もつれ光子を用いたベルの不等式の破れの実験と量子情報科学の先駆的研究”

2022年 ノーベル物理学賞



量子センサ
2020世界市場

0.5億\$

量子センサ

量子センサ
2020-27成長率

> 8.4%

量子通信

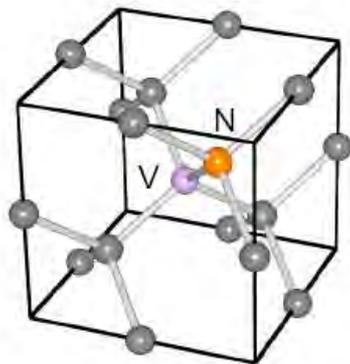
基礎学理・

量子情報科学
材料・物性 エレクトロニクス
フォトンクス スピントロニクス

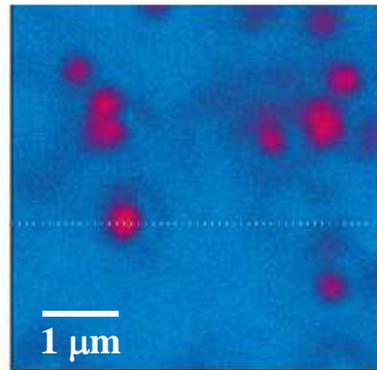
量子センサの最有力「ダイヤモンドNVセンター」

電子スピンの量子状態変化から物理量を高感度・高空間分解能に測定する

ダイヤモンドNVセンター

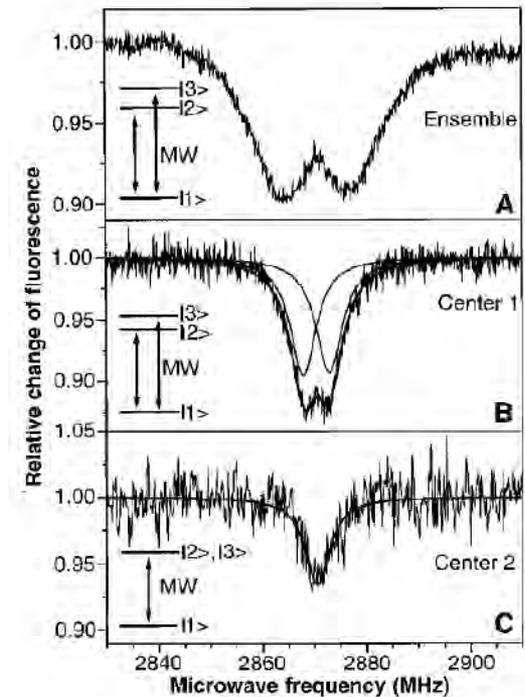


発光による量子状態読み出し



- ✓ 室温で安定な局在電子スピンの量子状態
- ✓ 外場による量子状態変化を測定

光・マイクロ波による量子状態初期化・制御

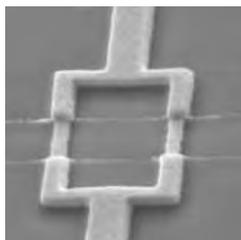


1997年の再発見を皮切りに、
室温・大気圧下で動作する量子センサ開発が急速に進展。

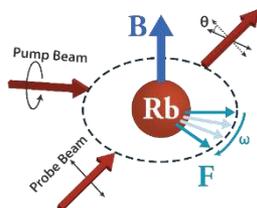
ダイヤモンドNVセンター量子センサの長所

ダイヤモンドNV量子センサは他にはない優れた特徴をもつ

高感度・高空間分解能, 室温・大気圧下で動作



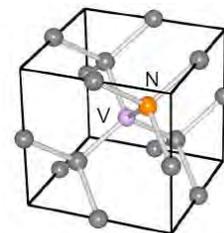
SQUID



OPM



TMR



NV

	SQUID	OPM	TMR	NV
磁場感度	$\sim 1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$	$\sim 1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$	$\sim 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$	$\sim 1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$
空間分解能	1 mm \sim	1 mm \sim	1 mm \sim	1 nm \sim
動作環境	極低温・真空	高温・真空	室温・大気圧	室温・大気圧



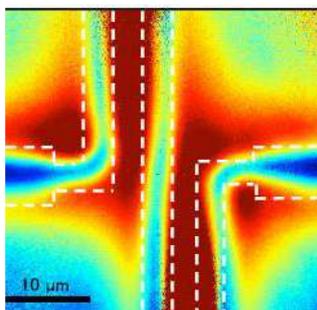
感度以外の性能は十分。感度もまだ改善の余地あり。

ダイヤモンドNVセンター量子センサの長所

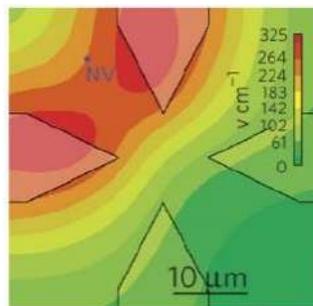
ダイヤモンド量子センサは他にはない優れた特徴をもつ

複数の物理量を測定可能
ベクトル測定可能

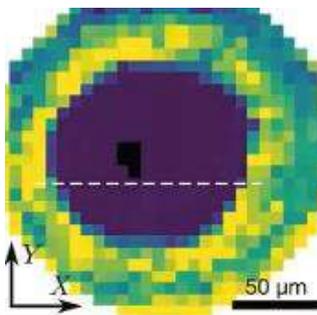
磁場[1]



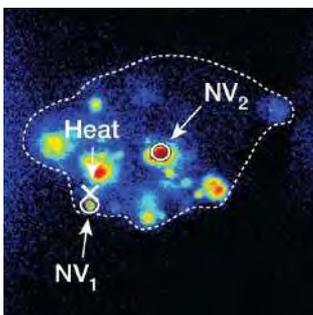
電場[2]



圧力[3]

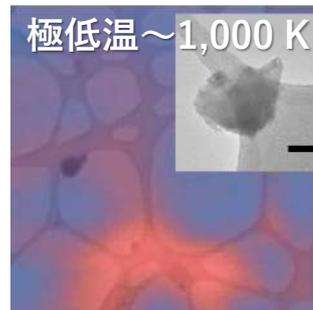


温度[4]

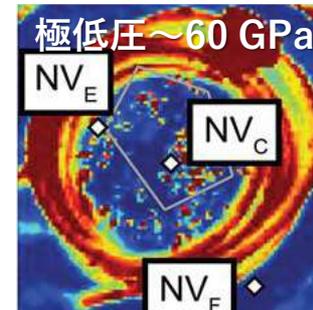


幅広い動作環境／測定対象
生体に無害

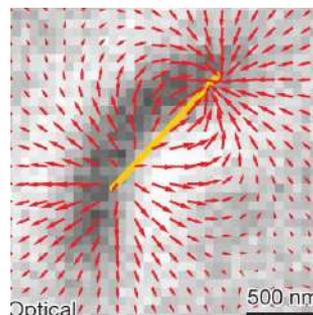
高温[5]



高圧[6]



生体[7]



デバイス・生体計測など幅広い分野への応用。基礎科学の発展にも寄与。

[1] Appl. Phys. Lett. (2018). [2] Nat. Phys. (2011). [3] Science (2019). [4] Nature (2013). [5] Nat. Commun. (2019). [6] Science (2019). [7] Nature (2013)., 参考：荒井慧悟（東工大），量子技術セミナー資料

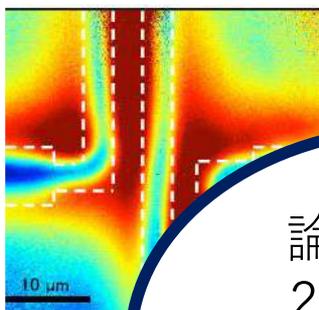
ダイヤモンドNVセンター量子センサの長所

ダイヤモンド量子センサは他にはない優れた特徴をもつ

複数の物理量を測定可能
ベクトル測定可能

磁場[1]

電場[2]



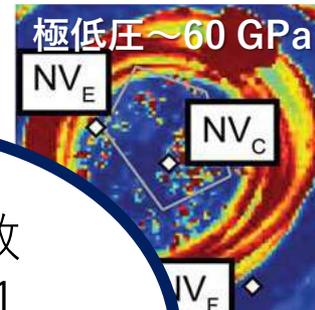
論文増加率
2001-2018

50%/年

幅広い動作環境／測定対象
生体に無害

高温[5]

高圧[6]



総特許件数
1998-2021

1200件

デバイス・生体計測など幅広い分野への応用。基礎科学の発展にも寄与。

[1] Appl. Phys. Lett. (2018). [2] Nat. Phys. (2011). [3] Science (2019). [4] Nature (2013). [5] Nat. Commun. (2019). [6] Science (2019). [7] Nature (2013)., 参考：荒井慧悟（東工大），量子技術セミナー資料

研究開発項目

多岐に渡る「量子」「古典」技術を統合する

ダイヤサンプル作製

ダイヤ結晶成長，イオン注入・電子線照射，同位体制御，ドーピング，位置制御，配向制御，微細加工（ピラー・レンズ加工），光共振器構造，表面処理・修飾など

量子状態制御技術（量子計測プロトコル）

電子スピン量子制御，核スピン量子制御など
周波数特性制御，感度向上，ノイズ除去

装置開発

光学系設計（共焦点，イメージング），MW・RF照射系設計（アンテナ，信号制御），磁場印加系，AFM系，生体計測系，計測プログラミングなど。

計測・信号処理技術

雑音除去（コモンモード作動検出，ロックイン検出）など

インフォマティクス

機械学習，データ推定など。

実装・応用

小型化，モバイル化，プローブ作製など。

量子物理
説明

研究開発項目

多岐に渡る「量子」「古典」技術を統合する

ダイヤサンプル作製

ダイヤ結晶成長，イオン注入・電子線照射，同位体制御，ドーピング，位置制御，配向制御，微細加工（ピラー・レンズ加工），光共振器構造，表面処理・修飾など

量子状態制御技術（量子計測プロトコル）

電子スピン量子制御，核スピン量子制御など
周波数特性制御，感度向上，ノイズ除去

装置開発

光学系設計（共焦点，イメージング），MW・RF照射系設計（アンテナ，信号制御），磁場印加系，AFM系，生体計測系，計測プログラミングなど。

計測・信号処理技術

雑音除去（コモンモード作動検出，ロックイン検出）など

インフォマティクス

機械学習，データ推定など。

実装・応用

小型化，モバイル化，プローブ作製など。

量子物理
解明

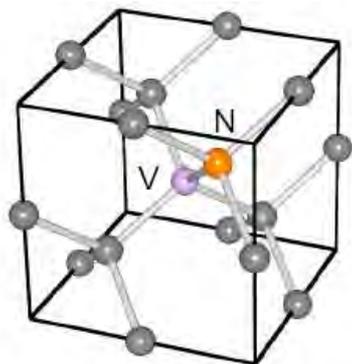
1. イントロダクション～量子センサへの期待～
2. ダイヤモンドNVセンター量子センサの原理
3. 研究紹介～スピン量子状態制御とセンシング～
 - 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
 - MW+RFによる電子スピン多重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用
4. 研究紹介～ダイヤモンドサンプル作製～
 - 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
 - (100)基板微細加工+CVD成長によるNV位置・配向制御

1. イントロダクション～量子センサへの期待～
2. ダイヤモンドNVセンター量子センサの原理
3. 研究紹介～スピン量子状態制御とセンシング～
 - 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
 - MW+RFによる電子スピン多重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用
4. 研究紹介～ダイヤモンドサンプル作製～
 - 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
 - (100)基板微細加工+CVD成長によるNV位置・配向制御

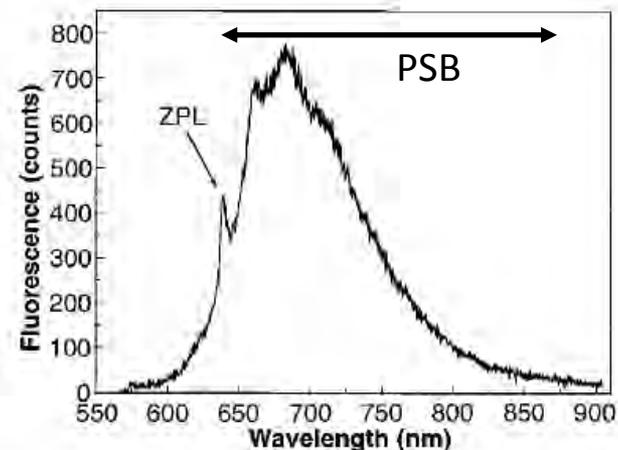
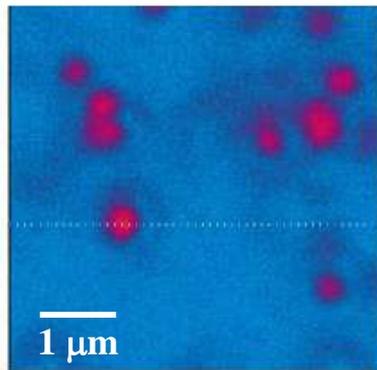
量子センサの最有力「ダイヤモンドNVセンター」

電子スピンの量子状態変化から物理量を高感度・高空間分解能に測定する

ダイヤモンドNVセンター



発光による量子状態読み出し



- ✓ 電子スピンの局在（三重項状態）
- ✓ 室温にて単一電子スピンからのナノスケール発光を観測可 ⇒ **高空間分解能**
- ✓ スピン量子状態に依存した発光

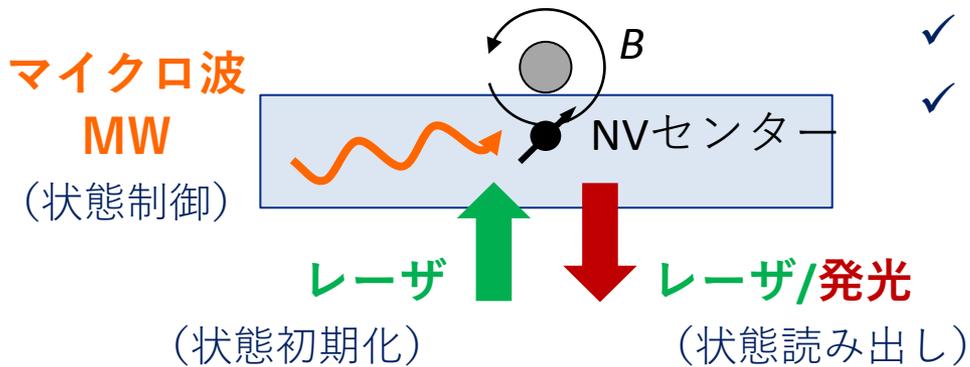
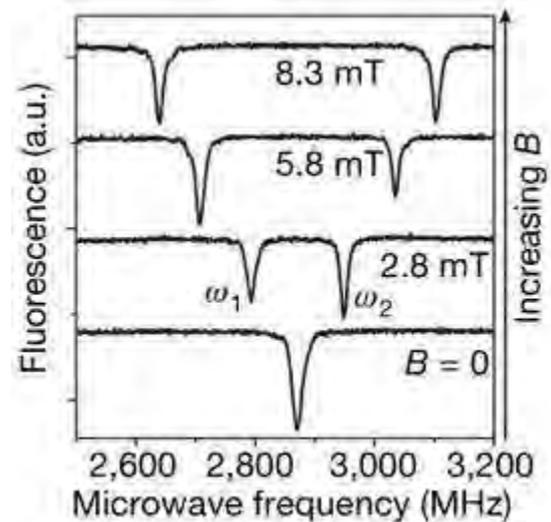
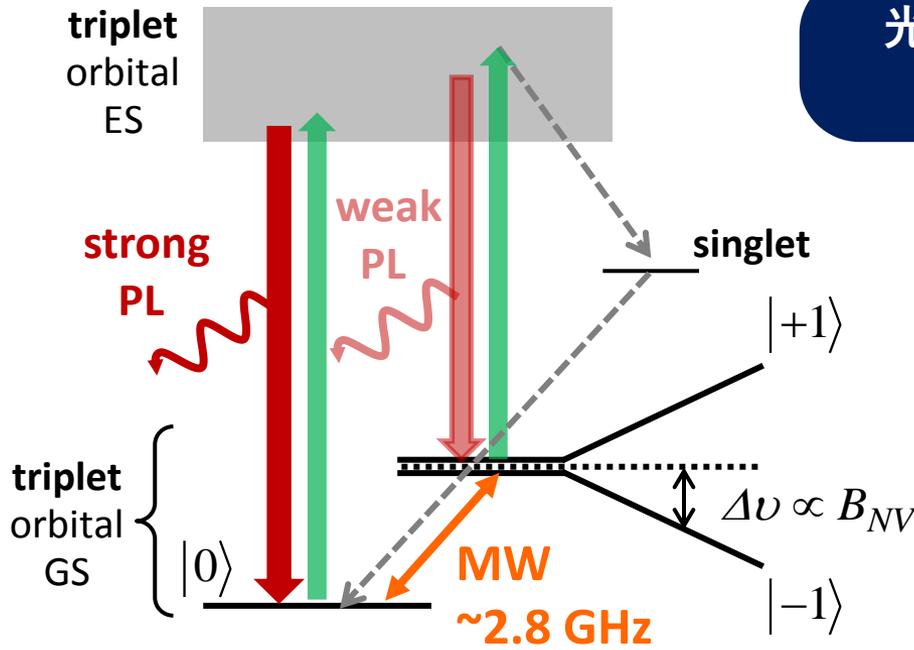


レーザー共焦点顕微鏡を用いて比較的容易にスピン量子状態の読み出しが可能。

ダイヤモンドNVセンターによる量子センサの原理

外場に脆弱な量子状態を利用して高感度センサを実現する

光・MWによる量子状態初期化・制御
(光検出磁気共鳴；ODMR)



- ✓ 高い偏極率 (通常ESRより3桁大きい)
- ✓ 室温で長いコヒーレンス時間 (~ms)

電子スピンの量子状態変化により
外場 (磁場, 電場, 温度,
圧力など) を高感度に測定

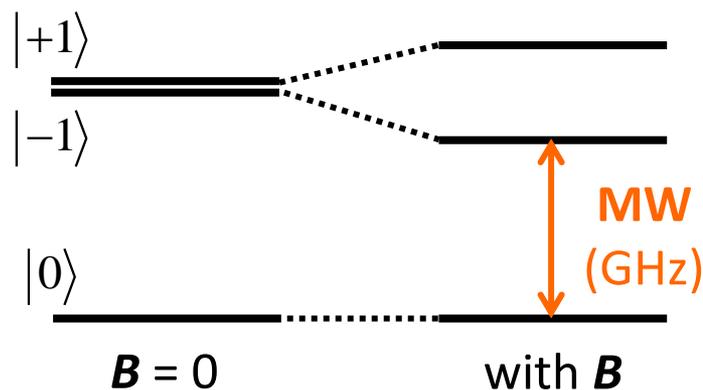
量子コヒーレンスを利用した高感度量子センサ

外場に脆弱な量子状態を利用して高感度センサを実現する



外場によるスピン量子コヒーレンス（重ね合わせ状態）の変化を測定

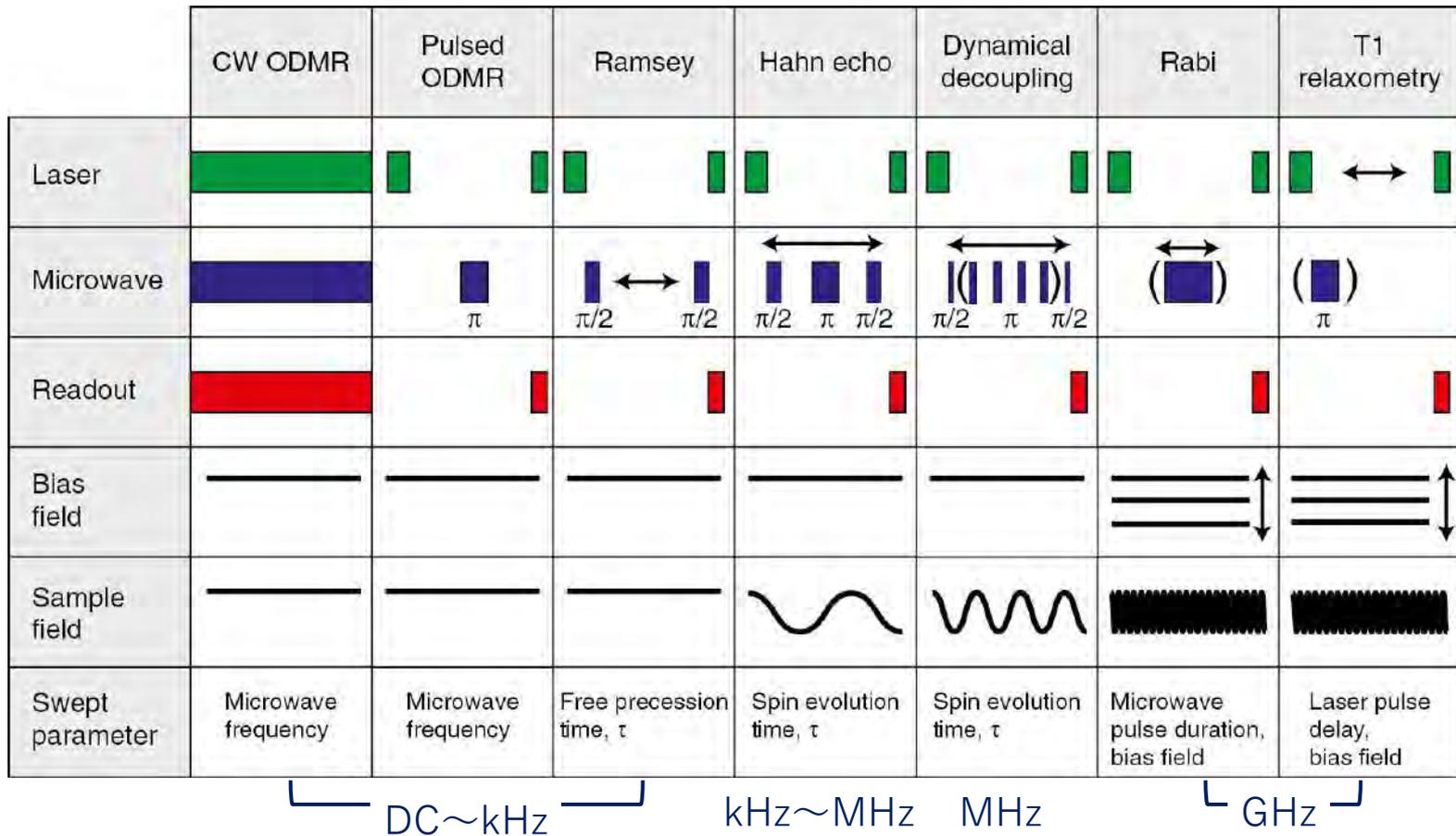
- ✓ 単一周波数MWで2準位系の重ね合わせ状態を制御
- ✓ 重ね合わせ状態の量子力学的な位相に外場情報を蓄積
⇒ **高感度化**が可能.
- ✓ 重ね合わせ状態が保たれている必要.



量子状態制御法が量子センサ性能（感度や周波数特性など）を決める。

種々の量子状態制御法 (CW or パルス制御)

量子状態制御法が量子センサ性能 (感度や周波数特性など) を決める



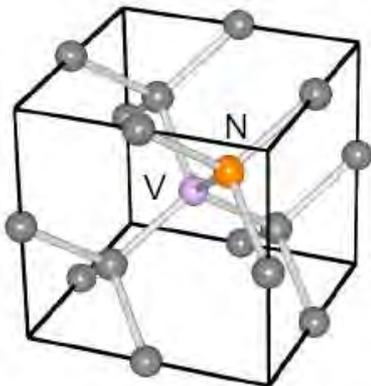
量子状態制御法の開発が量子センサの高性能化・高度化において重要。
 新たな量子状態生成など、量子物理の発展にも寄与。

1. イントロダクション～量子センサへの期待～
2. ダイヤモンドNVセンター量子センサの原理
3. 研究紹介～スピン量子状態制御とセンシング～
 - 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
 - MW+RFによる電子スピン多重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用
4. 研究紹介～ダイヤモンドサンプル作製～
 - 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
 - (100)基板微細加工+CVD成長によるNV位置・配向制御

1. イントロダクション～量子センサへの期待～
2. ダイヤモンドNVセンター量子センサの原理
3. 研究紹介～スピン量子状態制御とセンシング～
 - 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
 - MW+RFによる電子スピン多重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用
4. 研究紹介～ダイヤモンドサンプル作製～
 - 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
 - (100)基板微細加工+CVD成長によるNV位置・配向制御

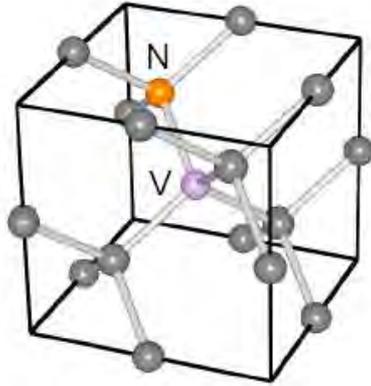
NV配向とベクトルAC磁場センシング

NV1



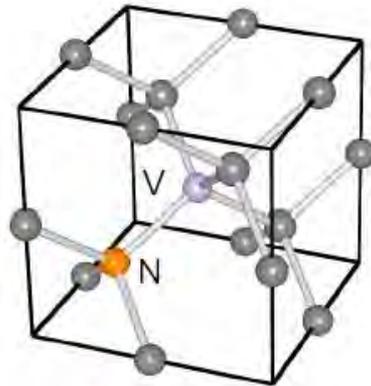
$$e_1 \parallel [111]$$

NV2



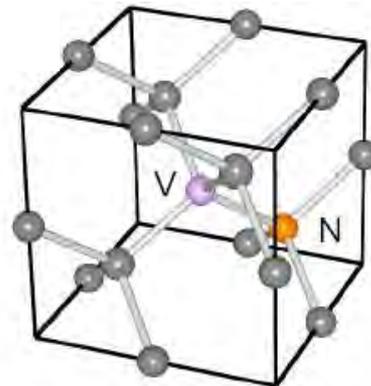
$$e_2 \parallel [\bar{1}\bar{1}1]$$

NV3

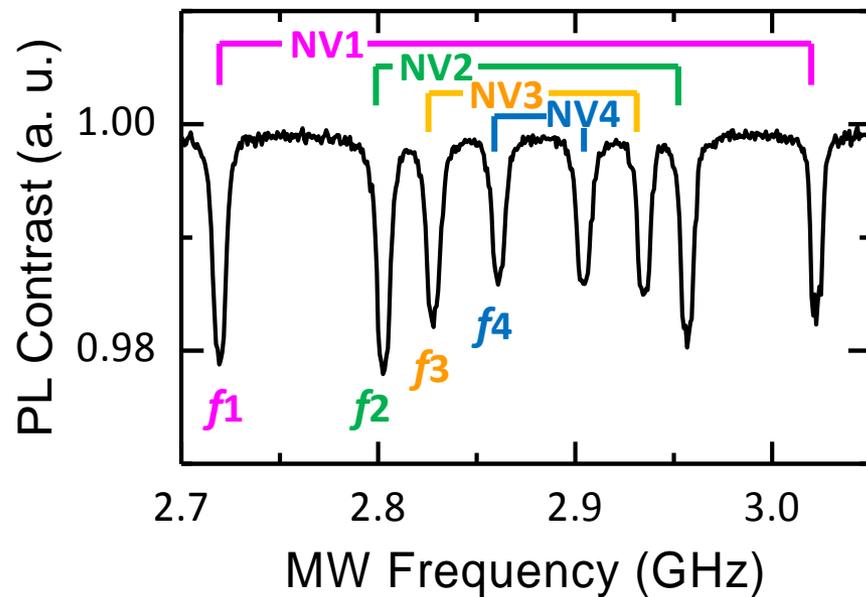
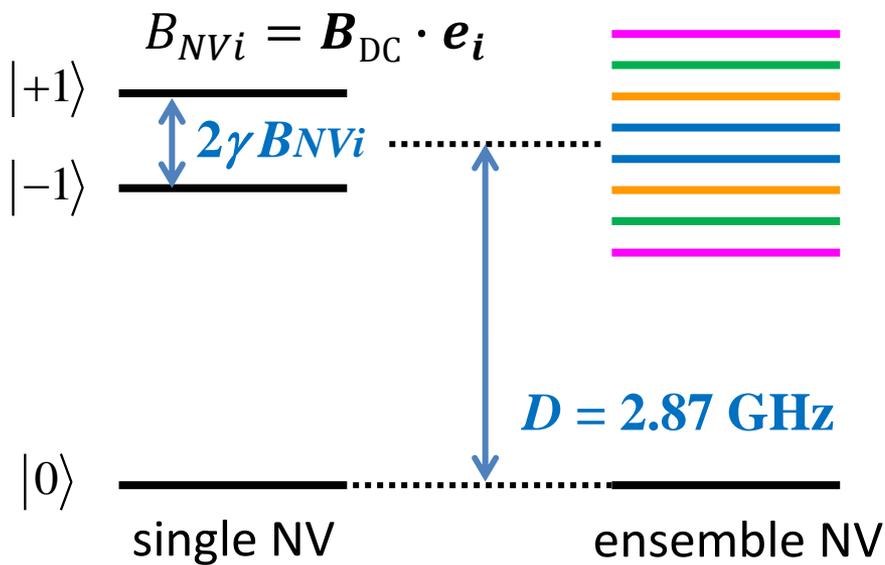


$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$

NV4

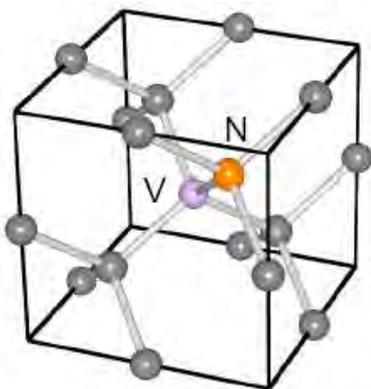


$$e_4 \parallel [\bar{1}1\bar{1}]$$



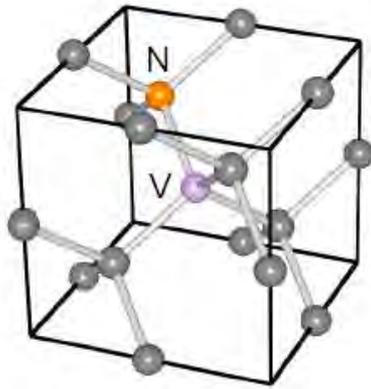
単一周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

NV1



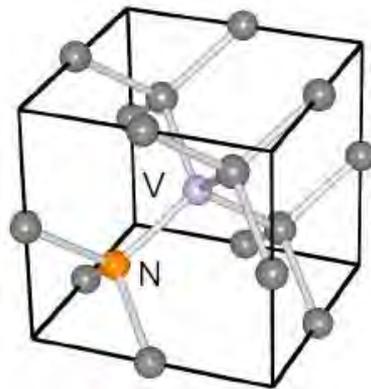
$$e_1 \parallel [111]$$

NV2



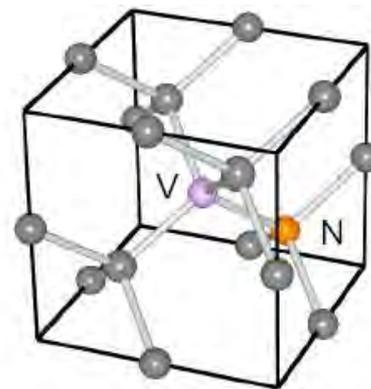
$$e_2 \parallel [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$$

NV3



$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$

NV4



$$e_4 \parallel [\bar{1}1\bar{1}]$$



$f1$

$$B_{NV1} = B_{AC} \cdot e_1$$

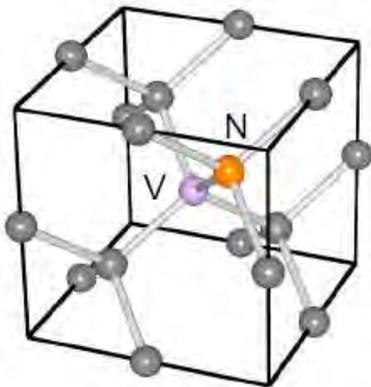


$f1$

with B_{DC}

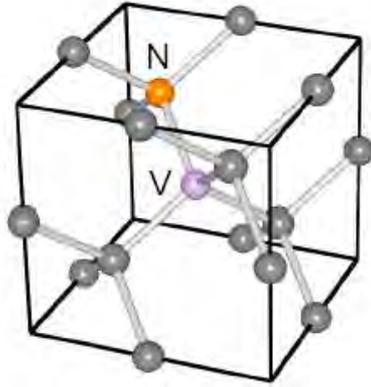
単一周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

NV1



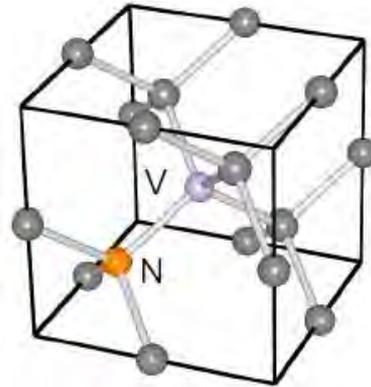
$$e_1 \parallel [111]$$

NV2



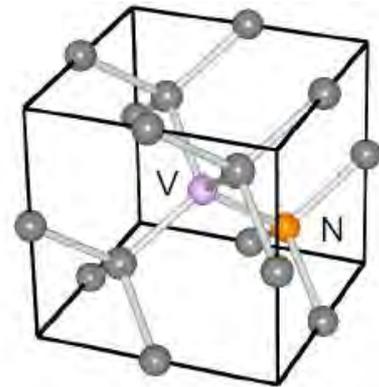
$$e_2 \parallel [\bar{1}\bar{1}1]$$

NV3



$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$

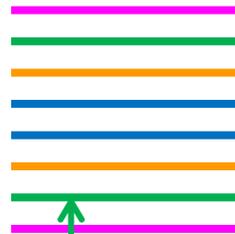
NV4



$$e_4 \parallel [\bar{1}1\bar{1}]$$



f_2



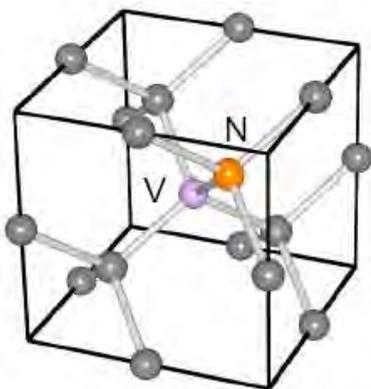
f_2

$$B_{NV2} = B_{AC} \cdot e_2$$

with B_{DC}

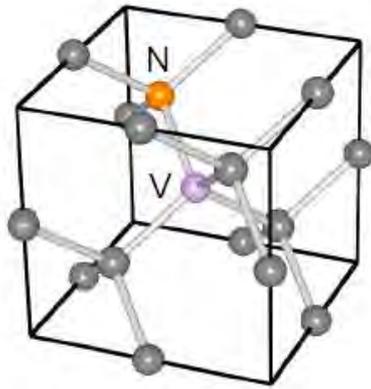
単一周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

NV1



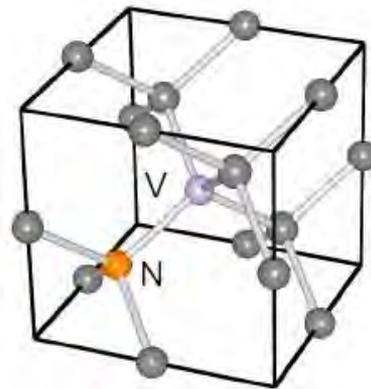
$$e_1 \parallel [111]$$

NV2



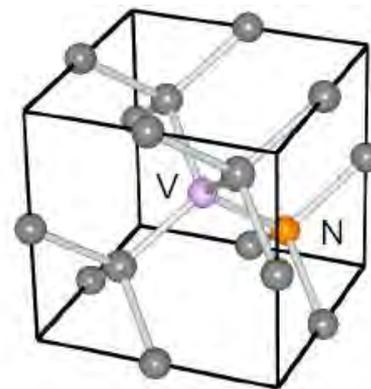
$$e_2 \parallel [\bar{1}\bar{1}1]$$

NV3

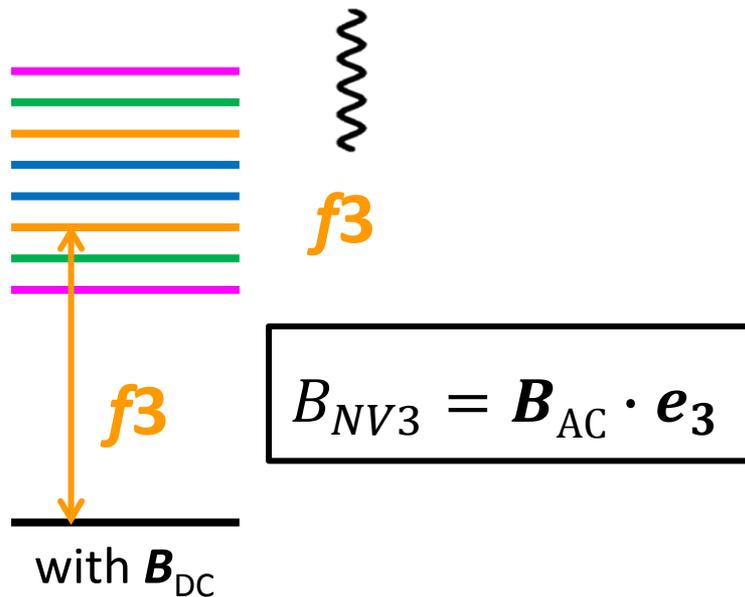


$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$

NV4

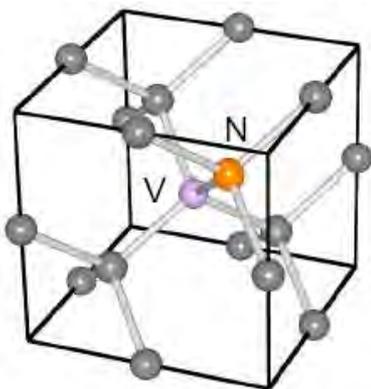


$$e_4 \parallel [\bar{1}1\bar{1}]$$



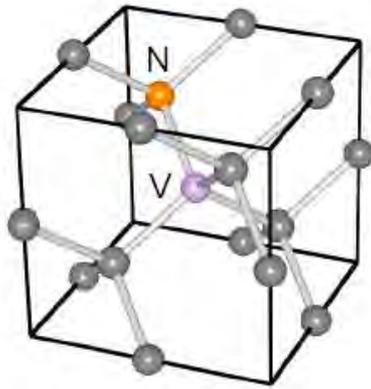
単一周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

NV1



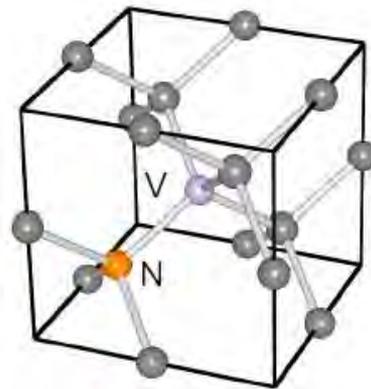
$$e_1 \parallel [111]$$

NV2



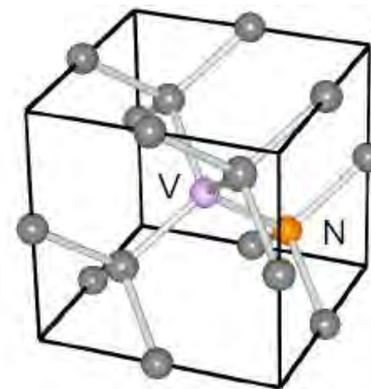
$$e_2 \parallel [-1\bar{1}1]$$

NV3

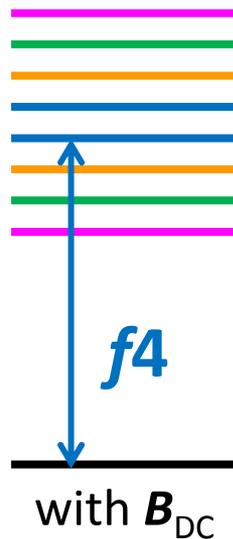


$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$

NV4



$$e_4 \parallel [-11\bar{1}]$$

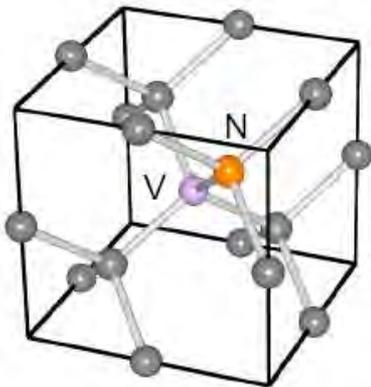


f_4

$$B_{NV4} = B_{AC} \cdot e_4$$

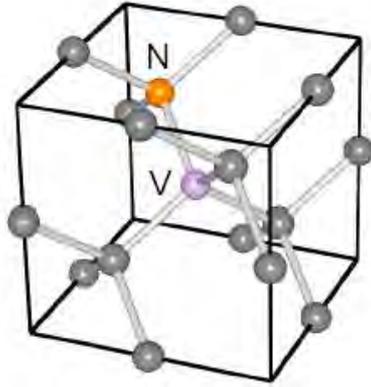
単一周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

NV1



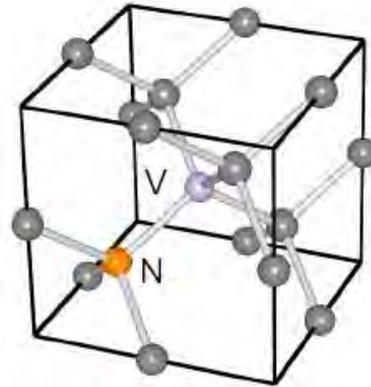
$$e_1 \parallel [111]$$

NV2



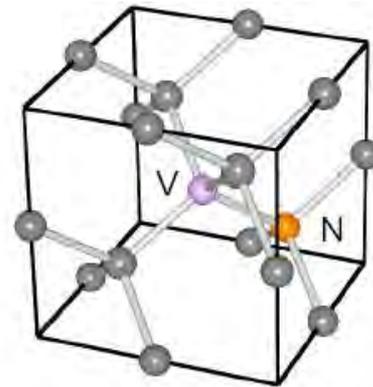
$$e_2 \parallel [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$$

NV3



$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$

NV4



$$e_4 \parallel [\bar{1}1\bar{1}]$$



f_1

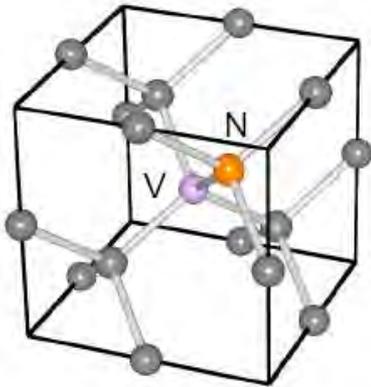
B_{AC} による
発光変化
(信号)

B_{AC} により変化しない発光 (ノイズ)

→ 低S/N ・ 低感度

多周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

NV1

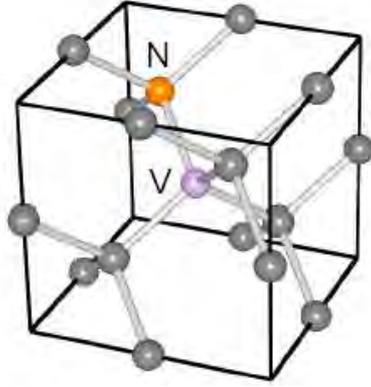


$$e_1 \parallel [111]$$



f_1

NV2

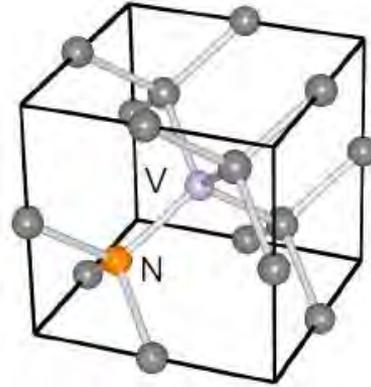


$$e_2 \parallel [-1\bar{1}1]$$



f_2

NV3

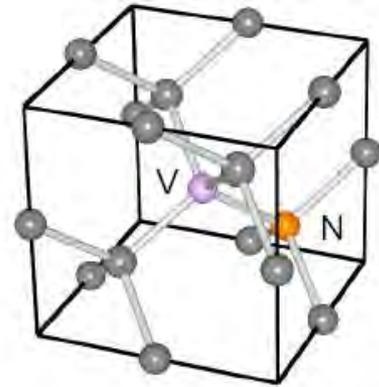


$$e_3 \parallel [1\bar{1}\bar{1}]$$



f_3

NV4



$$e_4 \parallel [-11\bar{1}]$$



f_4

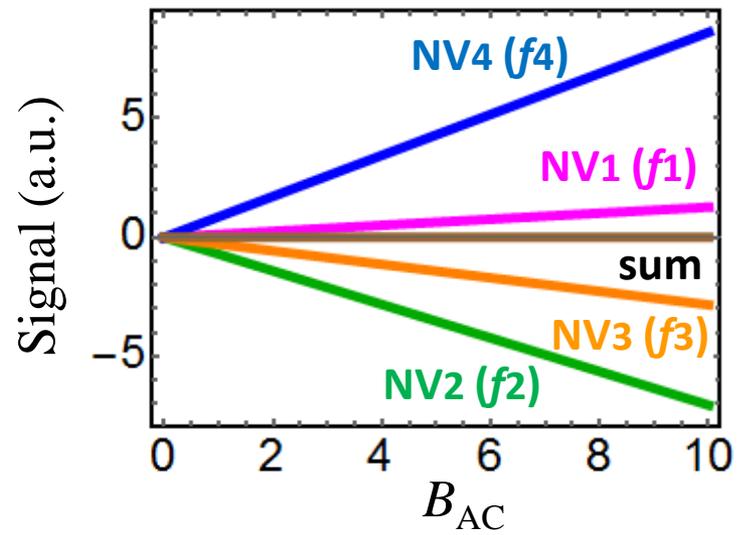
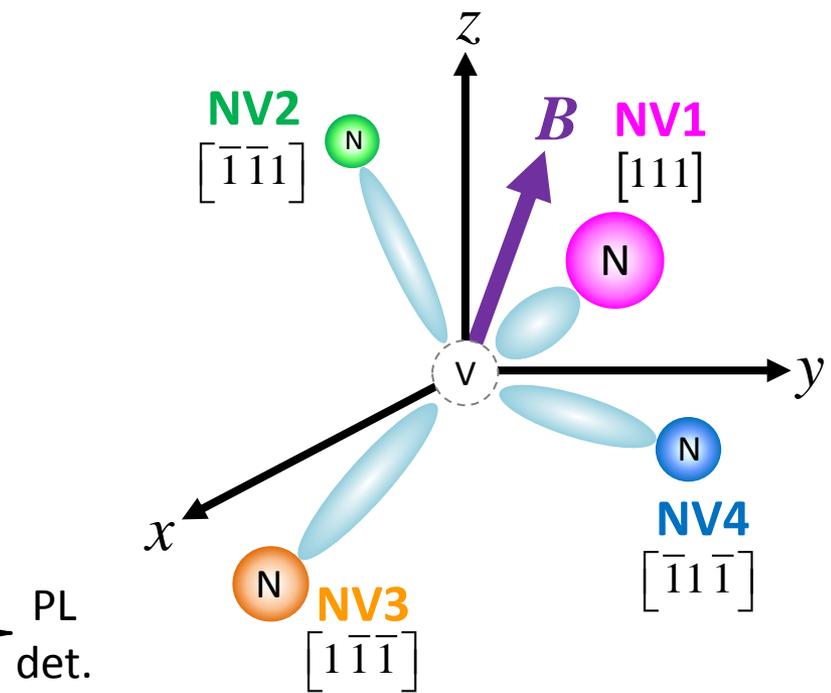
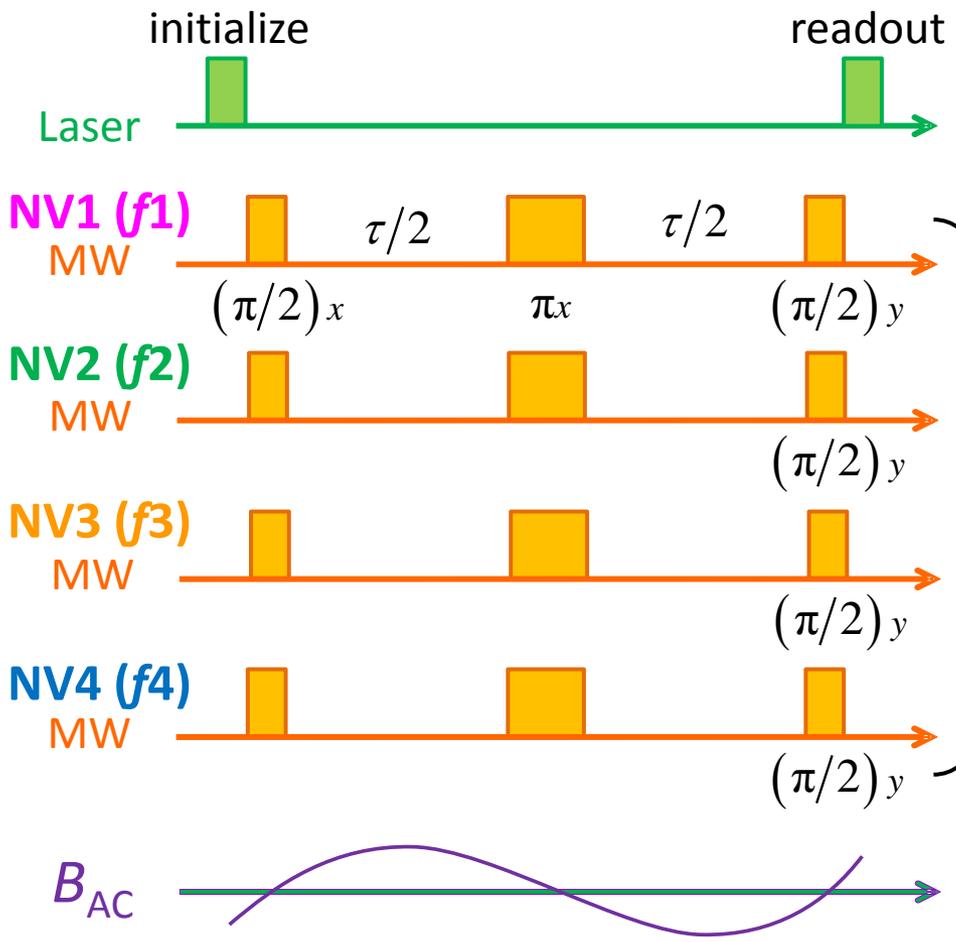
B_{AC} による発光変化 + ノイズ低減

◎電子スピン同時制御によるS/N向上・高感度化

◎MWにより高感度方向を制御可 ◎ベクトルセンシング可

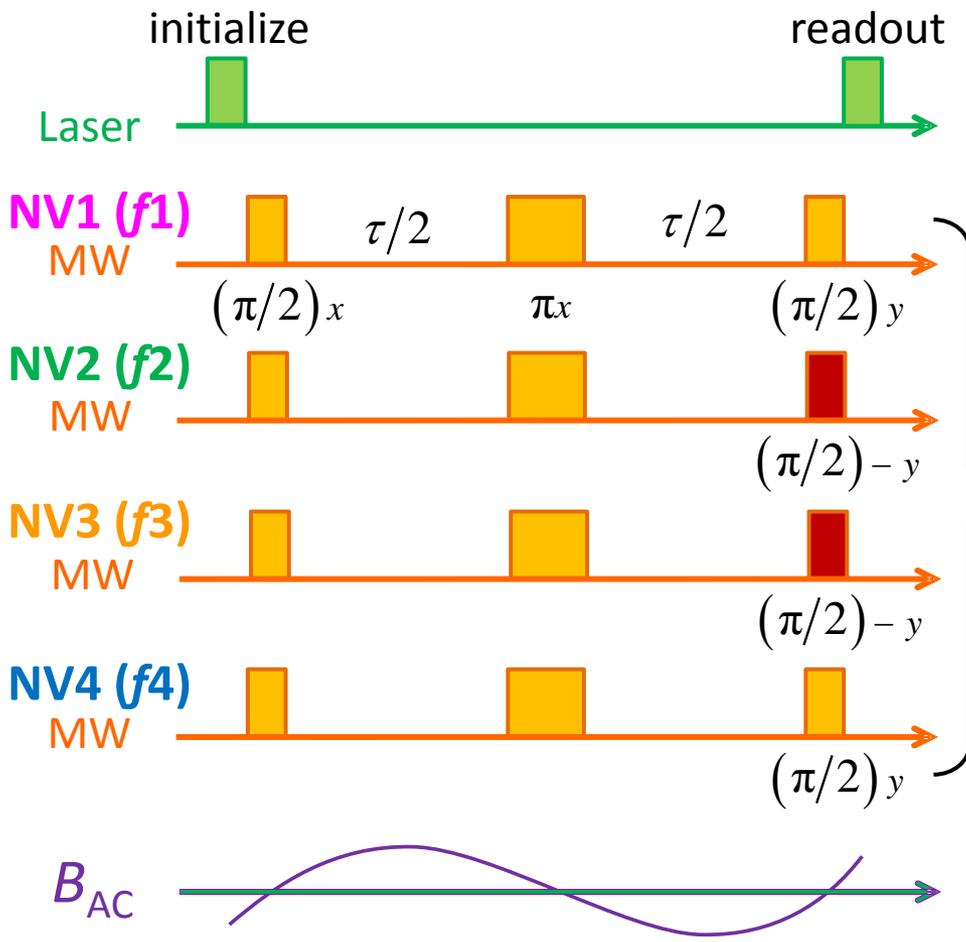
多周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

多周波数スピンエコーシーケンス

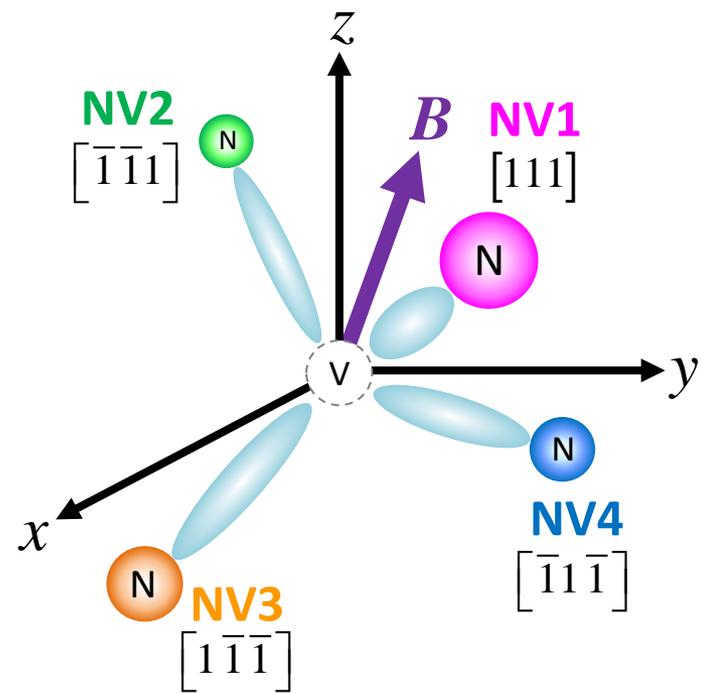


多周波数MWによるベクトルAC磁場センシング

多周波数スピンエコーシーケンス



PL det.

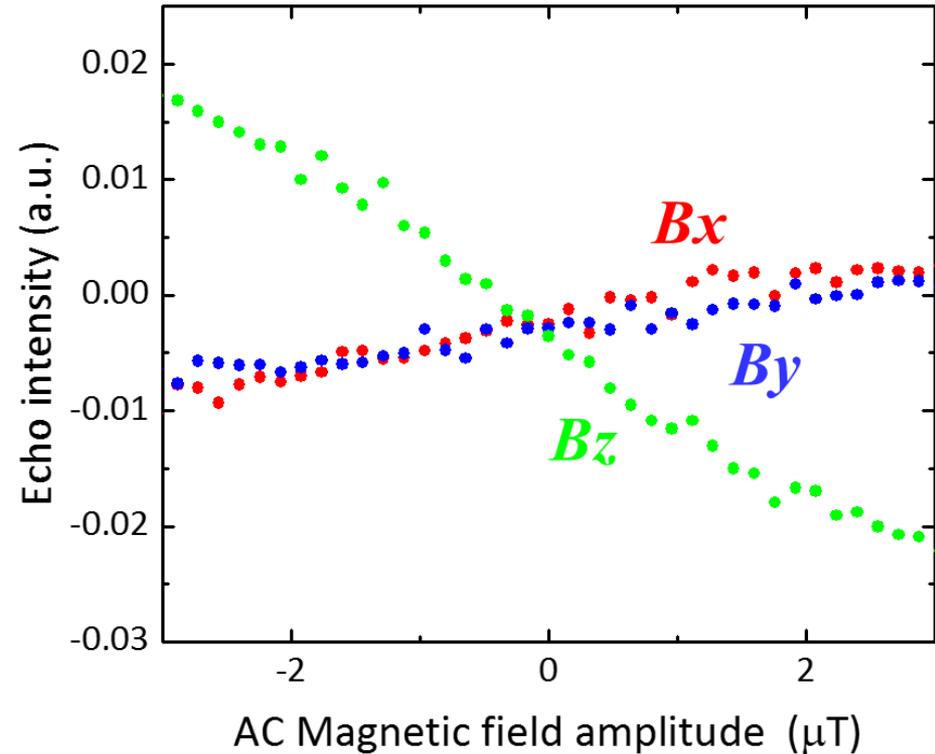
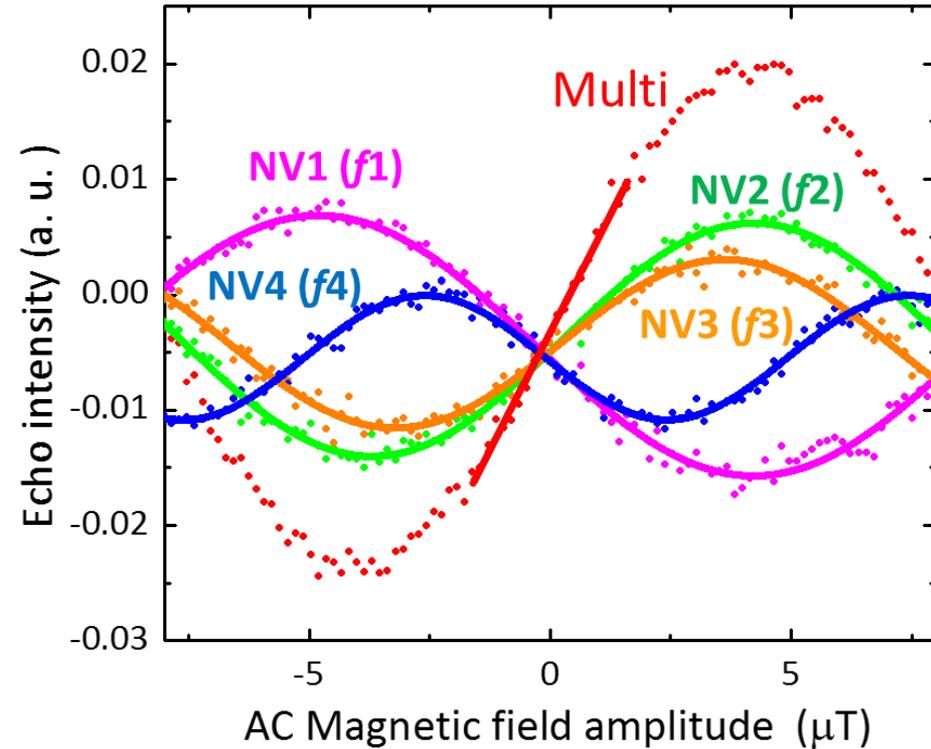


- reverse NV2 & NV4 $\rightarrow B_x$
- reverse NV2 & NV3 $\rightarrow B_y$
- reverse NV3 & NV4 $\rightarrow B_z$
- reverse NV1, reverse NV2
- reverse NV3, reverse NV4

多周波数MWによるベクトルAC磁場センシング (実験)

$B = (0.23, 0.17, -0.97) B_0$
100 kHz

direct measurement
of x, y, z components



磁場感度比
(実験)

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{\partial B_{\text{Single}}}{\partial B_{\text{Multi}}} > 2.2$$

磁場感度比
(計算)

$$2 \leq \eta_{\text{cal}} \leq 4$$

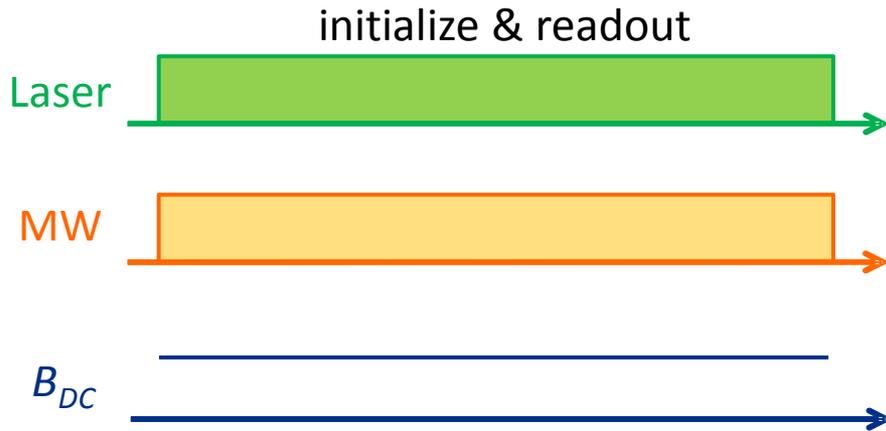
(ave. 2.48)

他のパルスシーケンスにも適用可能
(ラムゼー干渉による温度センシングでも感度向上を実証)

1. イントロダクション～量子センサへの期待～
2. ダイヤモンドNVセンター量子センサの原理
3. 研究紹介～スピン量子状態制御とセンシング～
 - 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
 - MW+RFによる電子スピン多重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用
4. 研究紹介～ダイヤモンドサンプル作製～
 - 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
 - (100)基板微細加工+CVD成長によるNV位置・配向制御

従来の磁場センシング手法

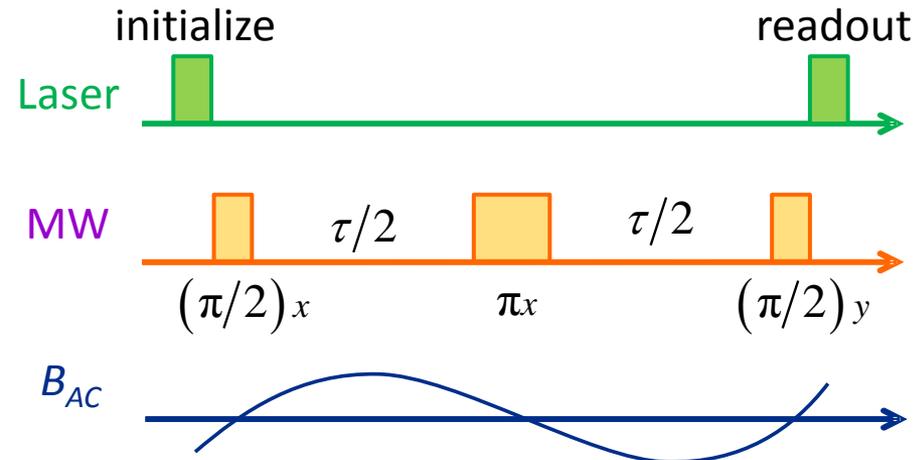
CW-ODMR



DC or AC (< kHz, GHz)

- 簡便な装置・シーケンス
- イメージングと相性が良い

パルスODMR (スピンエコーなど)



AC (kHz – MHz)

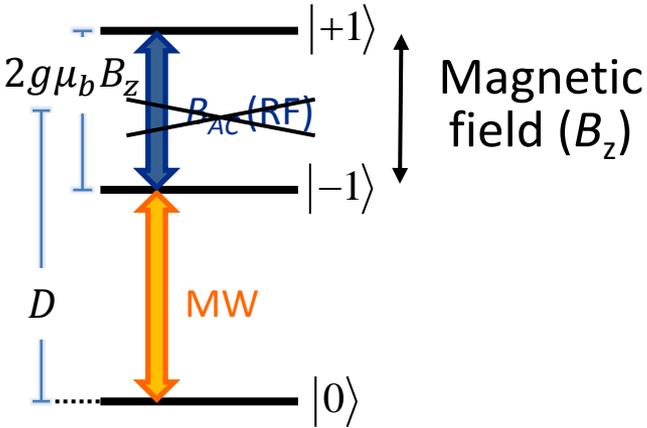
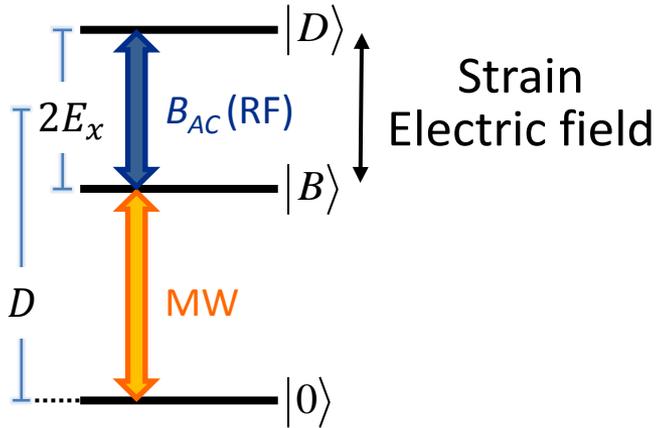
- △ 高価な装置・複雑なシーケンス
- △ イメージングと相性が悪い

電子スピン三重項状態のうち2準位のみ活用

3準位すべてをフルに活用 (電子スピン多重共鳴)

- ✓ CW-ODMRによる高周波AC磁場センシング・高感度温度センシング
- ✓ 多光子RFと電子スピンのコヒーレント相互作用 (RF-Dressed状態生成)

電子スピンの固有状態 (平行 or 垂直バイアス磁場)

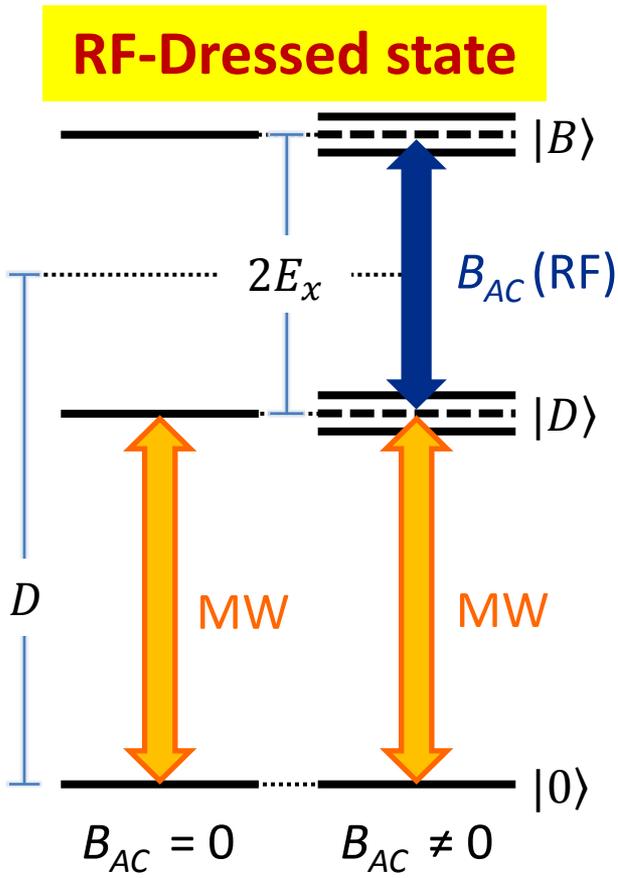
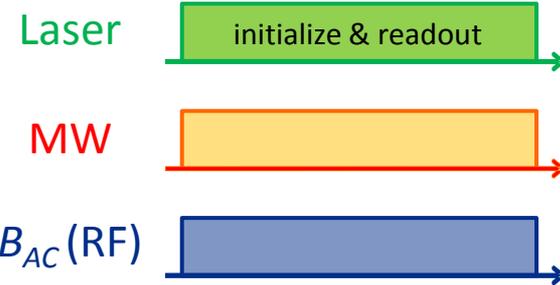
	$B_z \neq 0$	$B_z = 0$ (zero B or small B_x)
Energy level	 <p>Magnetic field (B_z)</p>	 <p>Strain Electric field</p>
Hamiltonian	$D\hat{S}_z^2 + g\mu_b B_z \hat{S}_z$	$D\hat{S}_z^2 + E_x(\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2) + E_y(\hat{S}_x \hat{S}_y + \hat{S}_y \hat{S}_x)$
Eigen states	$ 0\rangle, +1\rangle, -1\rangle$	$ 0\rangle, B\rangle = \frac{ +1\rangle + -1\rangle}{\sqrt{2}}, D\rangle = \frac{ +1\rangle - -1\rangle}{\sqrt{2}}$
Noise source	$\delta D, \delta B_z$	$\delta D, \delta E_x, \delta E_y$
Interaction with B_z	$\langle -1 \hat{S}_z +1 \rangle = 0$	$\langle B \hat{S}_z D \rangle = 1$

電子スピン二重共鳴によるRF-Dressed状態の生成

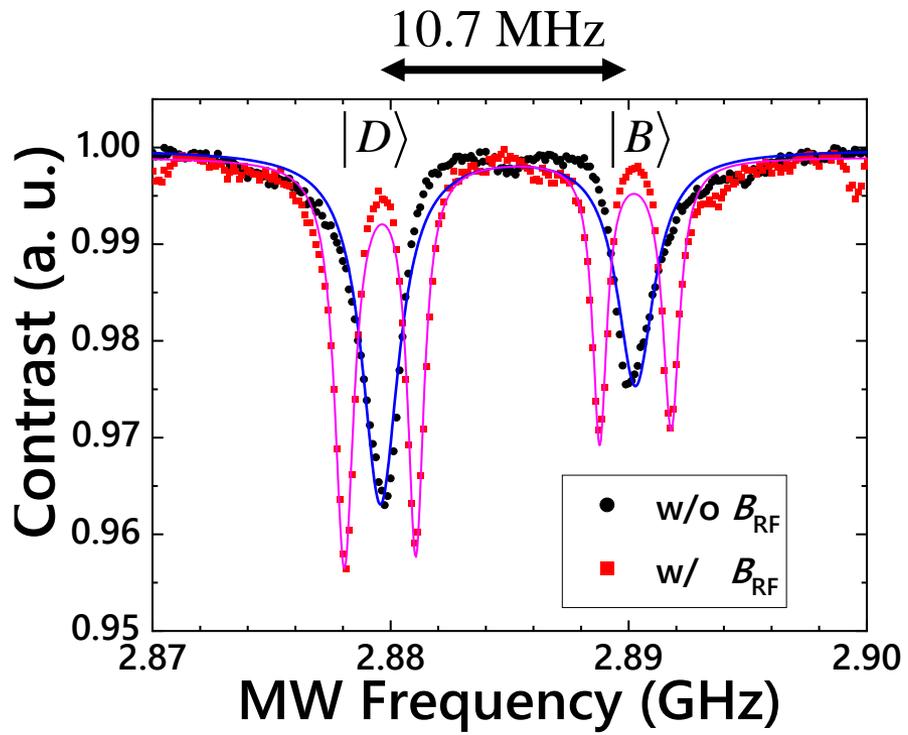
Hamiltonian (under zero static parallel B -field)

$$H = D\hat{S}_z^2 + E_x(\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2) + E_y(\hat{S}_x\hat{S}_y + \hat{S}_y\hat{S}_x)$$

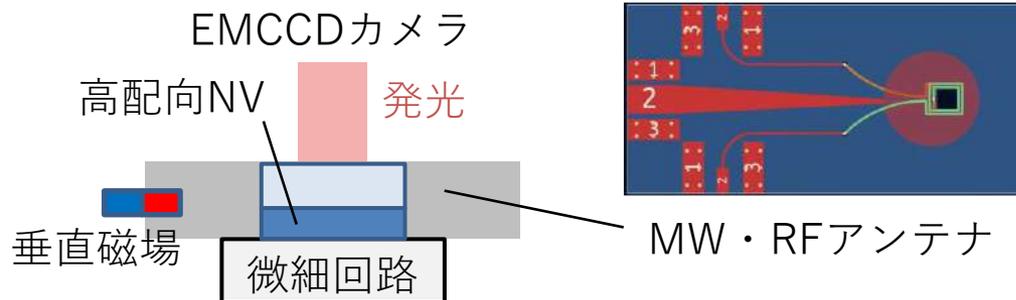
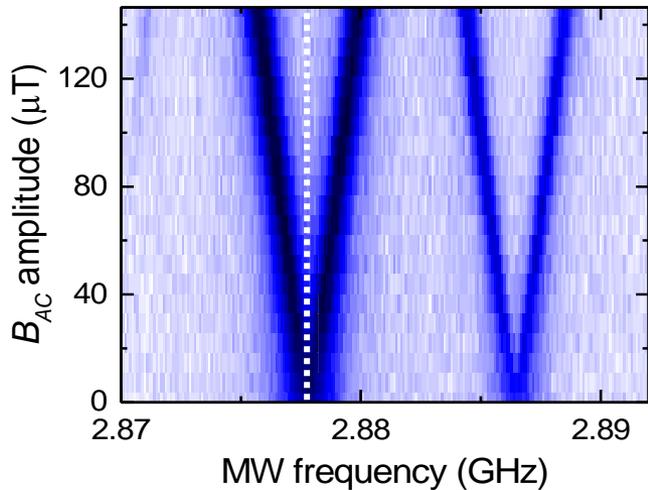
$$|B\rangle = \frac{|+1\rangle + |-1\rangle}{\sqrt{2}}, |D\rangle = \frac{|+1\rangle - |-1\rangle}{\sqrt{2}}$$



CW-ODMR spectra (cal.)

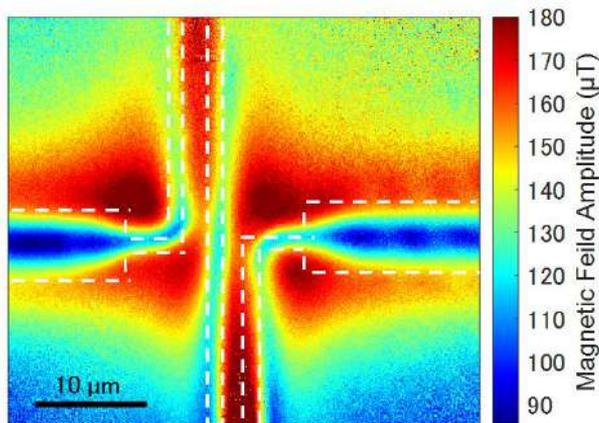


微細回路の交流磁場/電流イメージングへの応用



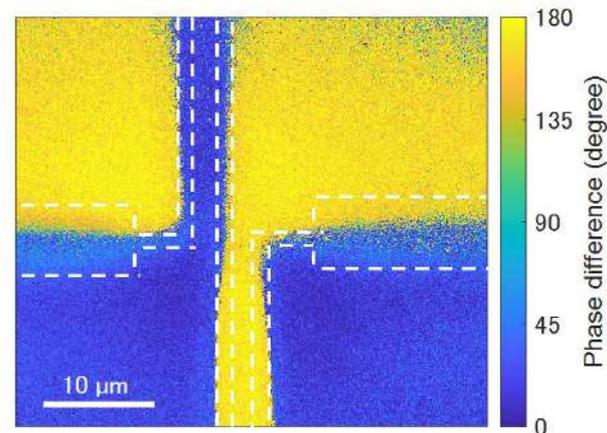
MW antenna: K. Sasaki, *et al.*,
Rev. Sci. Instrum. **87**, 053904 (2016).

振幅イメージ (12.4 MHz)



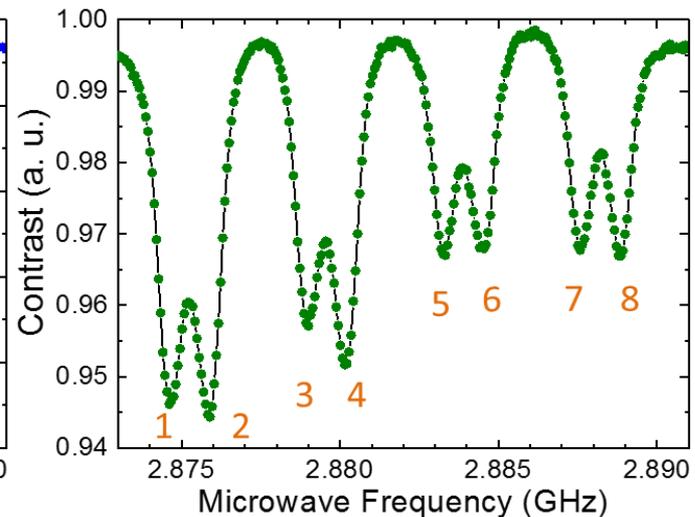
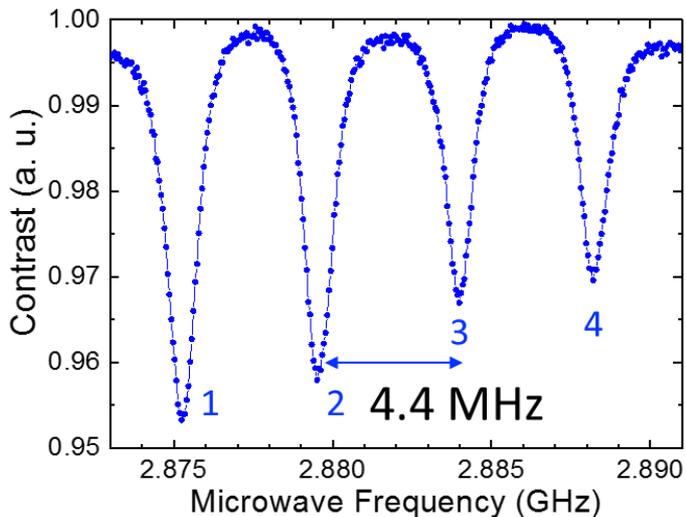
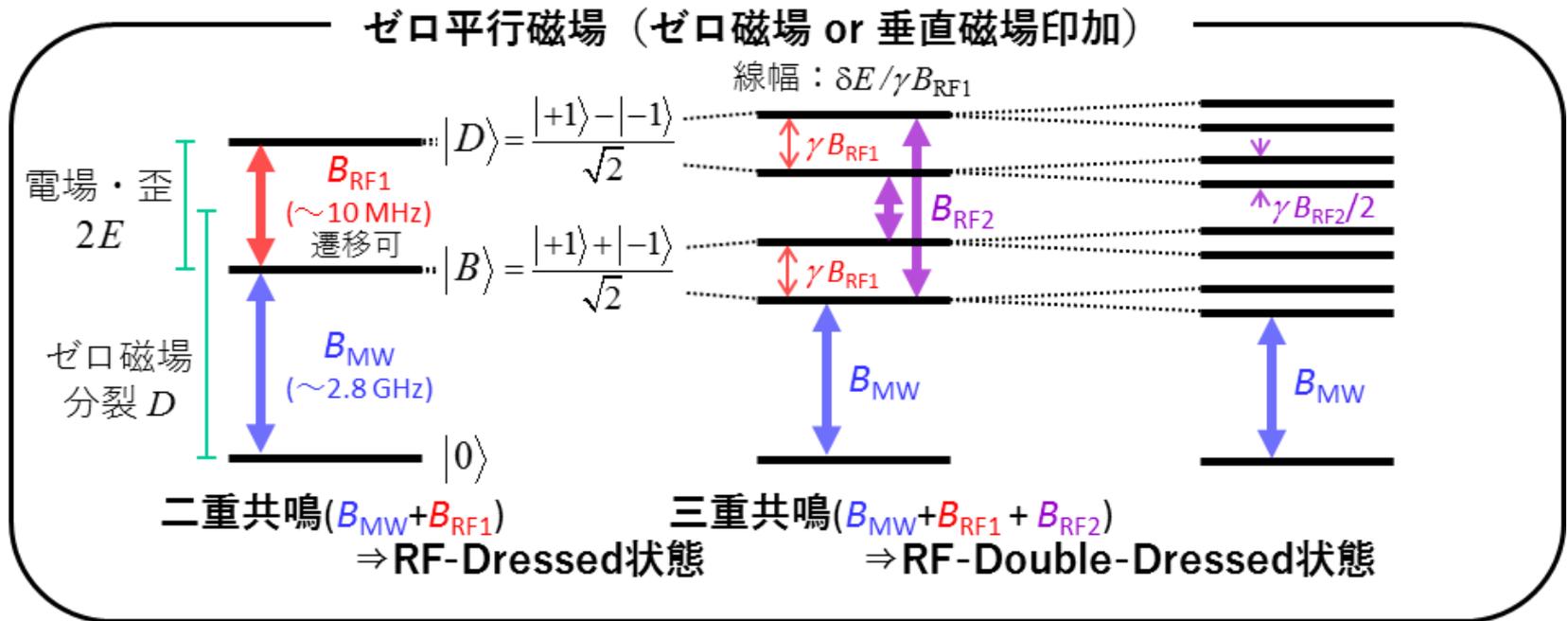
微細回路
(L/S : 2 μm)

位相イメージ (参照AC磁場印加)

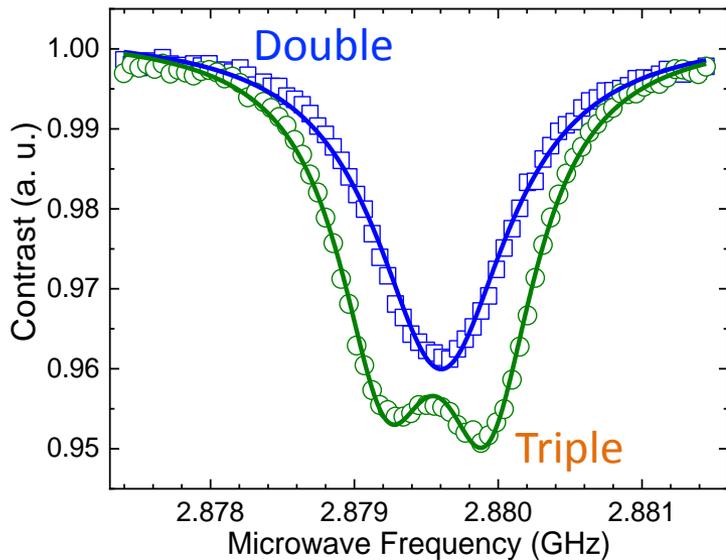
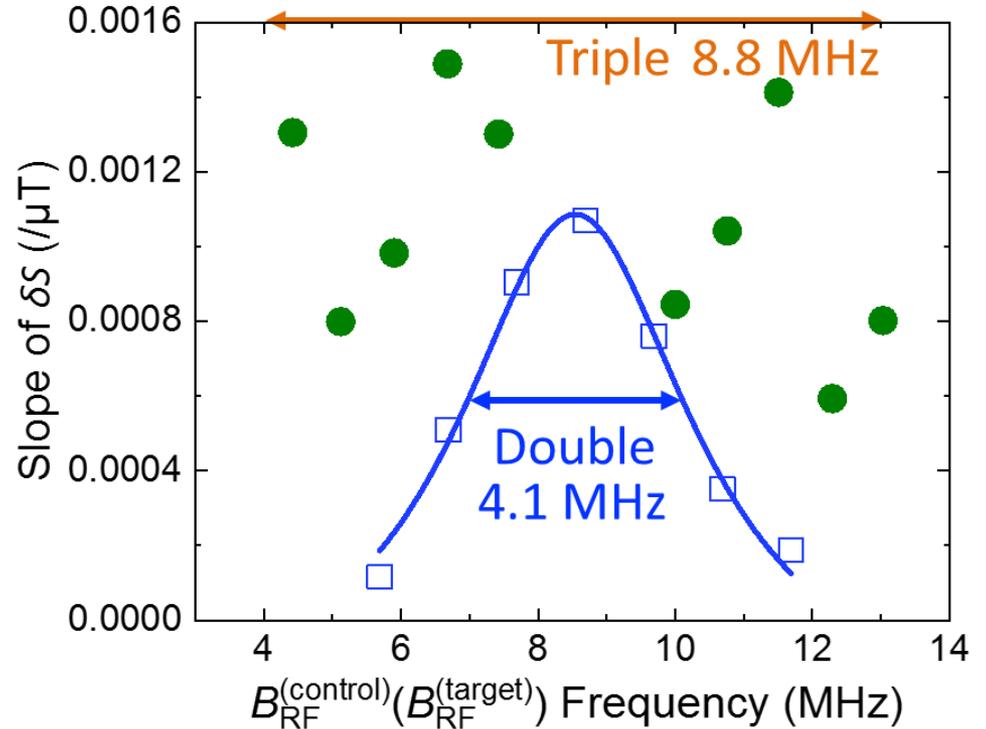
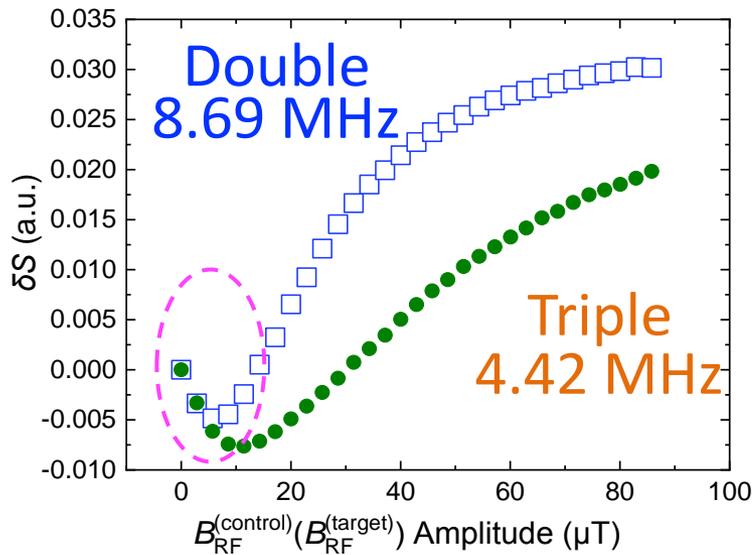


CW-ODMRでマイクロスケールの微細回路磁場/電流を非接触にイメージ可能。

電子スピン三重共鳴によるRF-Double-Dressed状態の生成

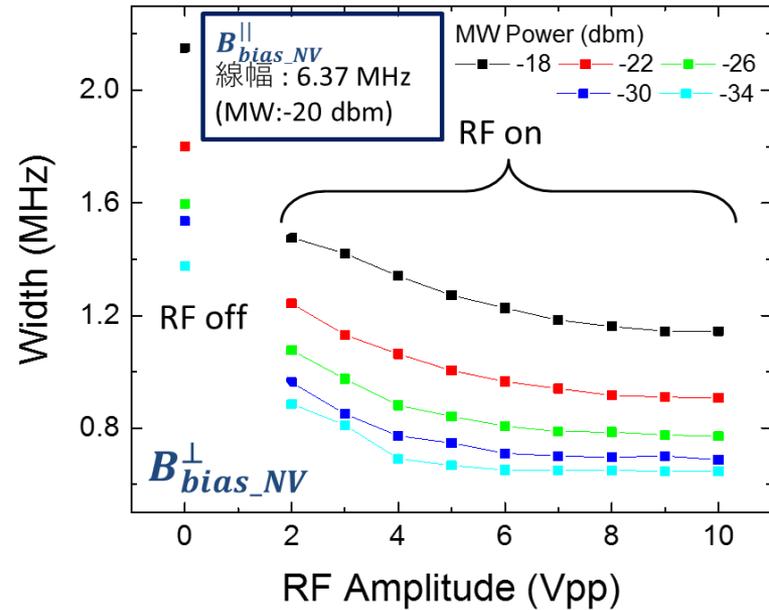
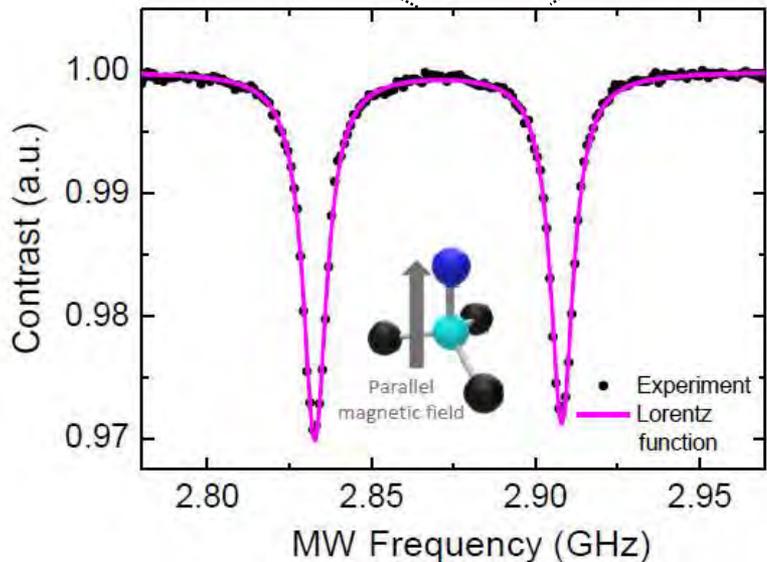
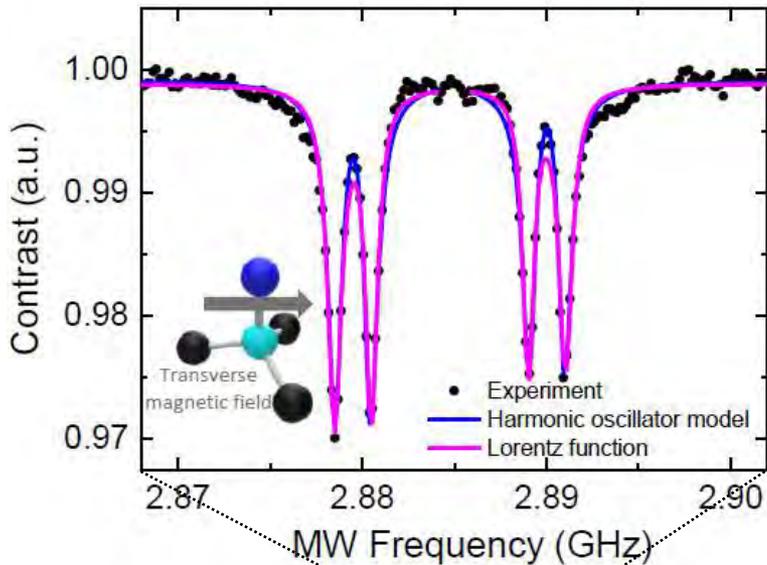


電子スピン三重共鳴によるRF-Double-Dressed状態の生成



- ✓ 約2倍以上広帯域化
- ✓ 狭線幅化により感度劣化を抑制
- ✓ B-D間ポピュレーション遷移によるコントラスト増加

RF-Dressed状態生成による線幅減少



垂直磁場印加による
磁場揺らぎ抑制

+

RF-Dressed状態による
歪ゆらぎ抑制

$$\delta\omega_{MW} \approx \frac{(\delta E_x)^2}{\gamma_e B_{RF}}$$

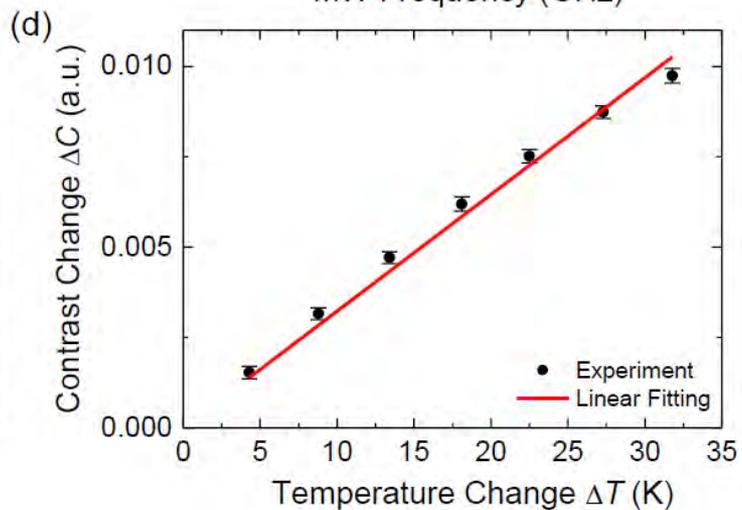
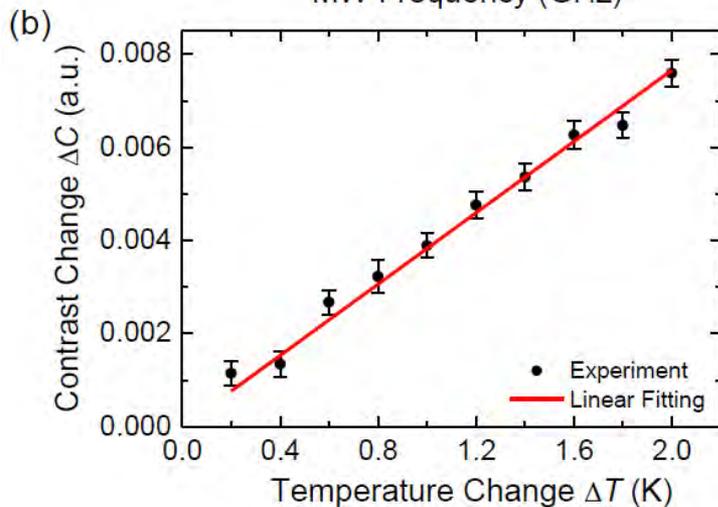
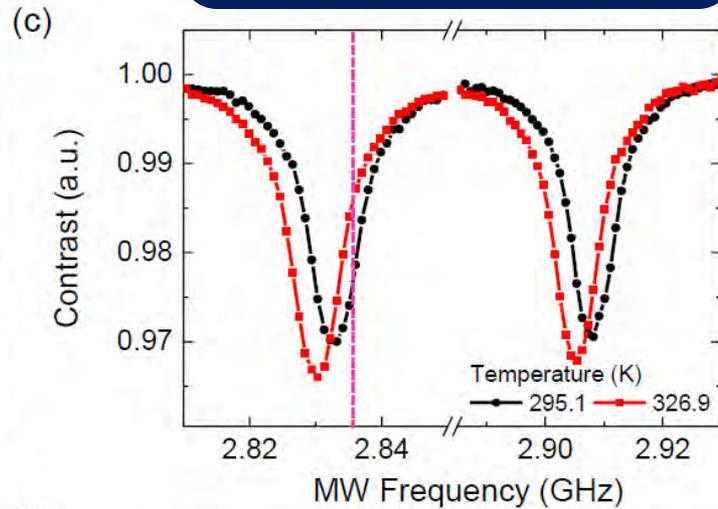
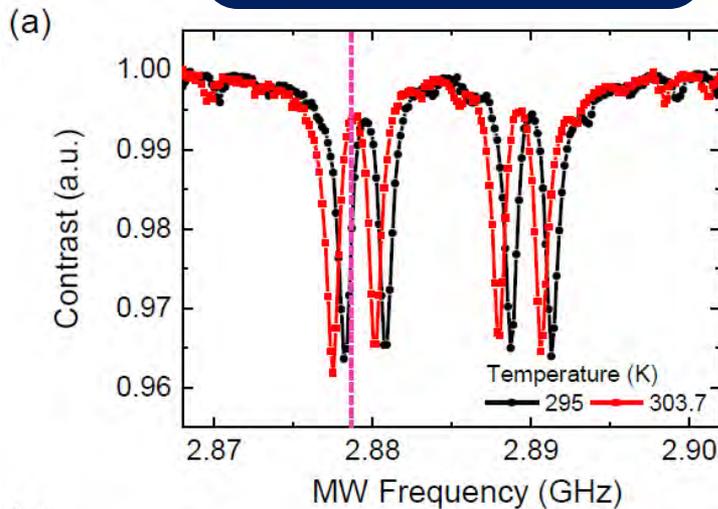


温度センサの高感度化

RF-Dressed状態生成による温度感度向上

垂直磁場 + RF磁場

平行磁場 (従来法)

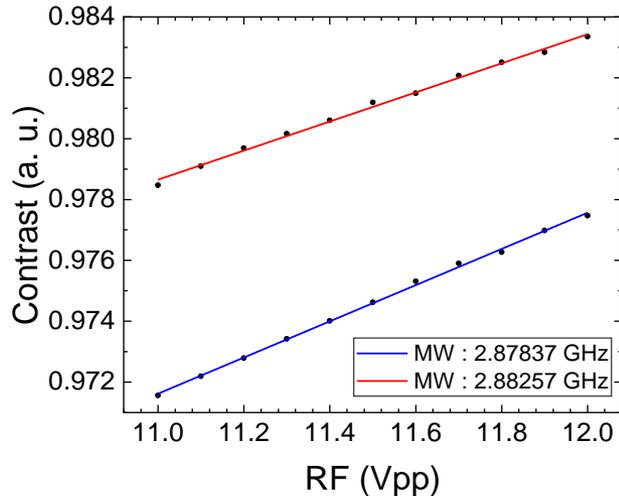


$$\eta_{\text{mea}}: 50.4 \text{ mK/Hz}^{1/2} \longleftarrow \eta_{\text{mea}}: 419 \text{ mK/Hz}^{1/2}$$

8倍感度向上!

RF-Dressed状態を用いた交流磁場・温度複合センシング

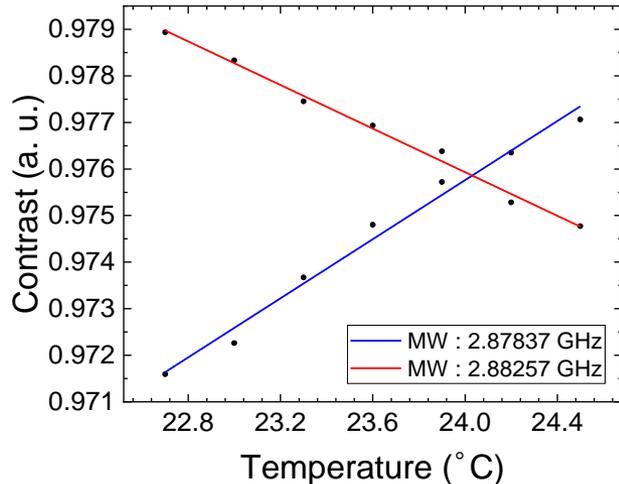
交流磁場vs.コントラスト



2点測定による交流磁場・温度複合センシング

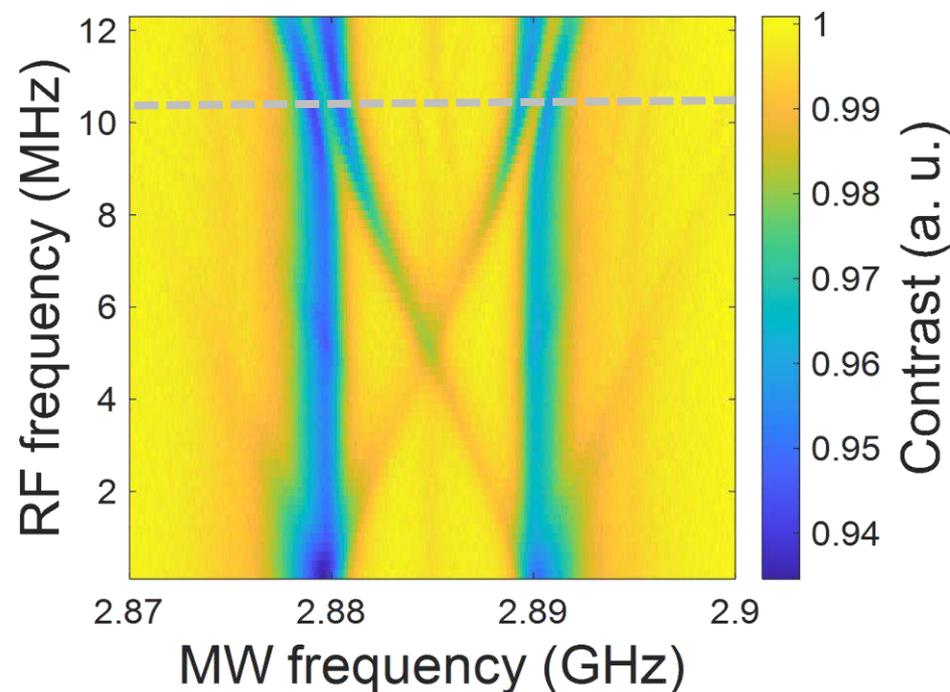
設定値	実測値
$\Delta T = 0.2 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.200 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.2823 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.2598 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.2 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.600 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.2187 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.6236 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.2 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.800 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.3146 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.8281 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.4 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.200 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.3961 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.2542 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.4 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.400 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.4584 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.4632 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.4 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.800 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.4273 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.8279 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.8 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.200 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.6917 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.2383 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.8 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.600 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.736 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 0.699 \text{ Vpp}$
$\Delta T = 0.8 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 1.000 \text{ Vpp}$	$\Delta T = 0.7364 \text{ K}$ $\Delta B_{ACZ} = 1.0503 \text{ Vpp}$

温度vs.コントラスト

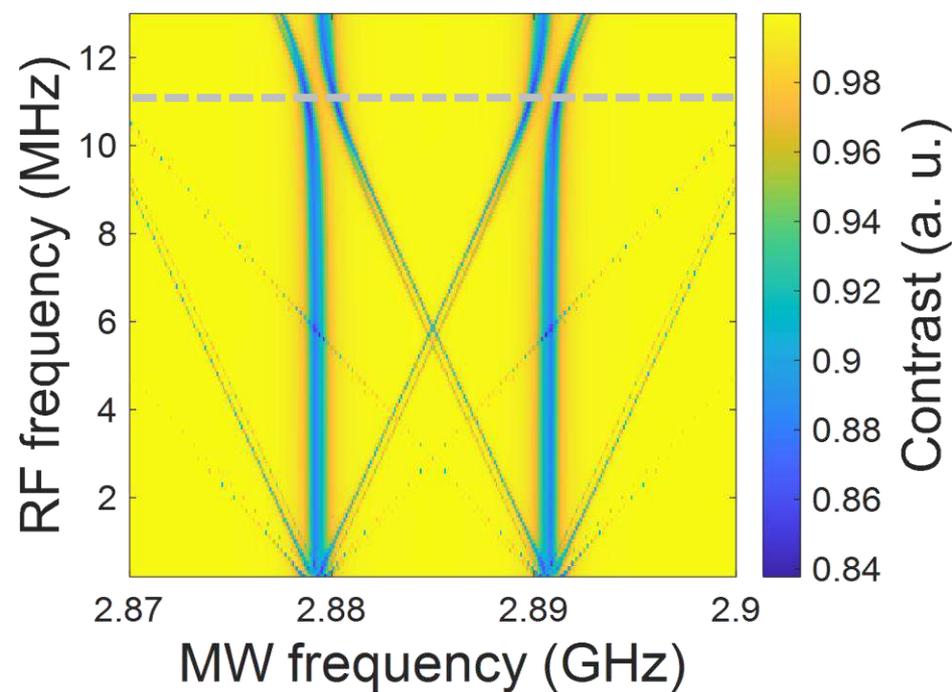


弱RF下における電子スピン二重共鳴現象の周波数特性

実験結果 (2 Vpp)



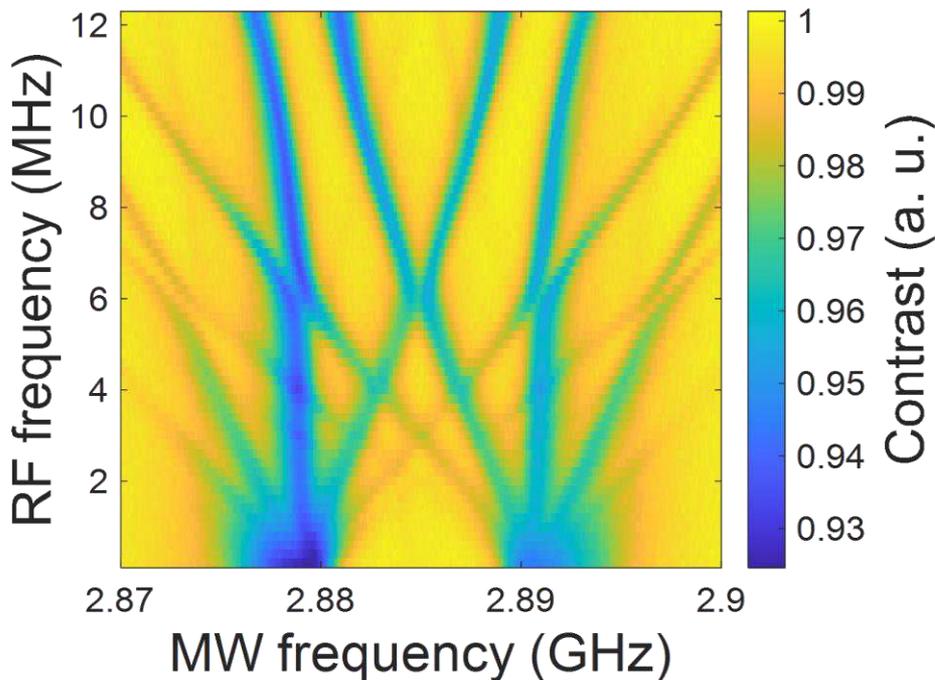
数値計算結果 (50 μ T)



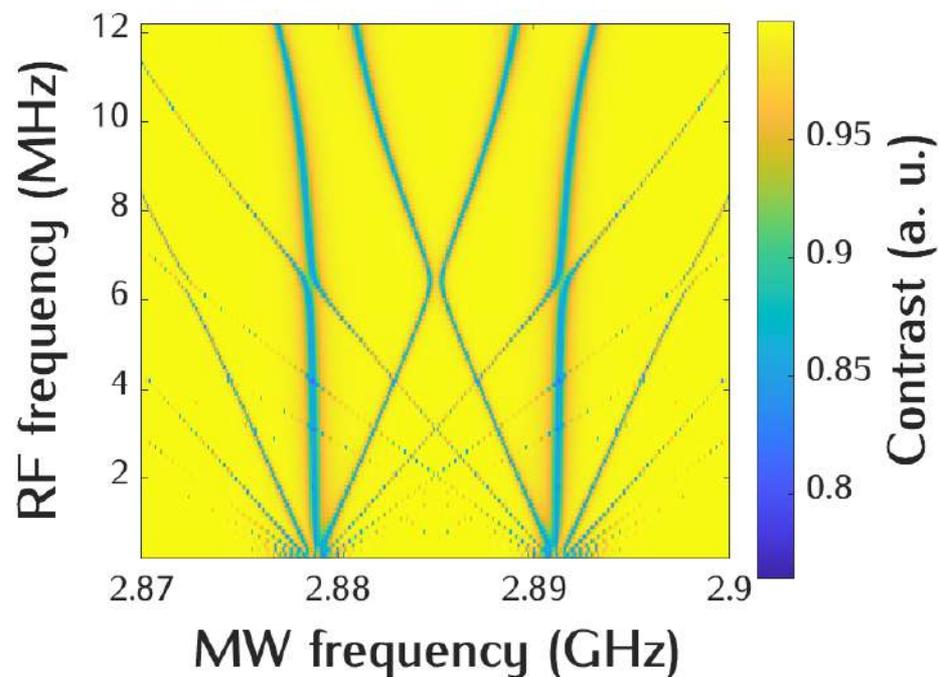
✓ 周波数特性は2周波に対するRabiの理論と一致

強RF下における電子スピン二重共鳴現象の周波数特性

実験結果 (7 Vpp)



数値計算結果 (146 μ T)

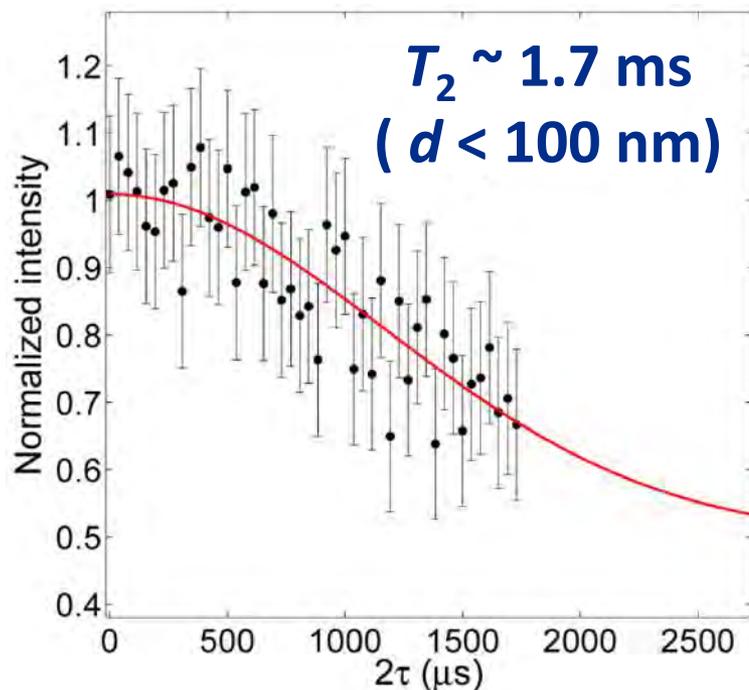
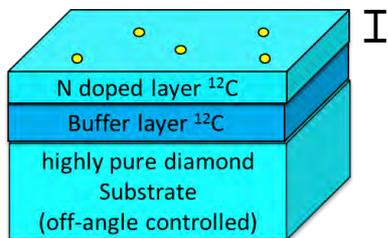


- ✓ 弱励起下の理論では説明できないアンチクロス構造が出現。
 - ✓ RF多光子過程（フロケ理論）で説明可能。
- ✓ 微小な平行磁場印加により本来現れないRF2光子過程が許容に。

1. イントロダクション～量子センサへの期待～
2. ダイヤモンドNVセンター量子センサの原理
3. 研究紹介～スピン量子状態制御とセンシング～
 - 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
 - MW+RFによる電子スピン多重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用
4. 研究紹介～ダイヤモンドサンプル作製～
 - 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
 - (100)基板微細加工+CVD成長によるNV位置・配向制御

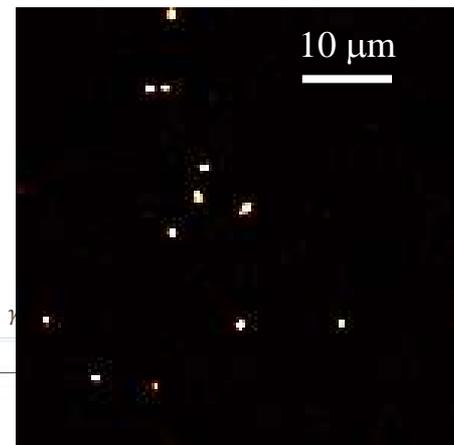
窒素ドーブ同位体制御CVDダイヤモンド成長によるNV生成

^{12}C 同位体制御による
スピノヒーレンス時間の延伸

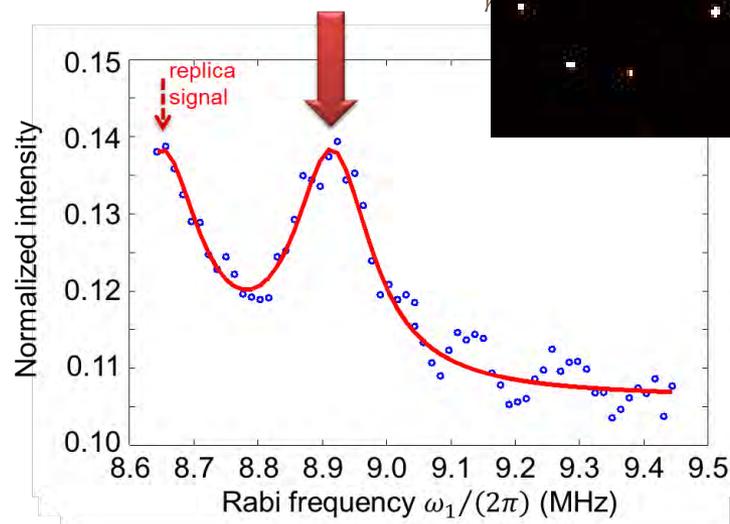


極浅 (<5 nm) 表面NV生成

- ✓ 高密度窒素ドーブ
- ✓ 表面酸素終端化



$$\left(\frac{\omega_1}{2\pi}\right) = \gamma B_0$$



- ✓ スピンロッキングによる
6,000個プロトンNMR

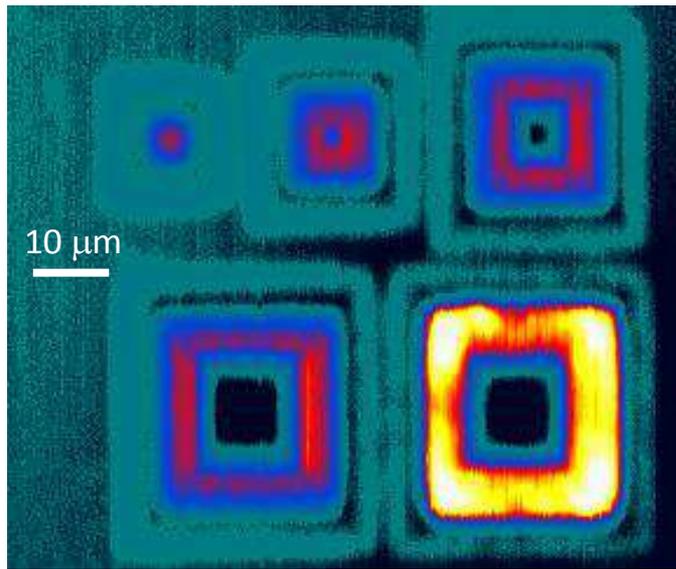
溝構造(100)基板上CVD成長によるNV選択生成

**Focused Ion Beam
or Lithography + RIE**
(various widths L and depths D)



Chemical Vapor Deposition (CVD)
(nitrogen gas doping,
isotopically-enriched ^{12}C , ^{15}N or ^{14}N)

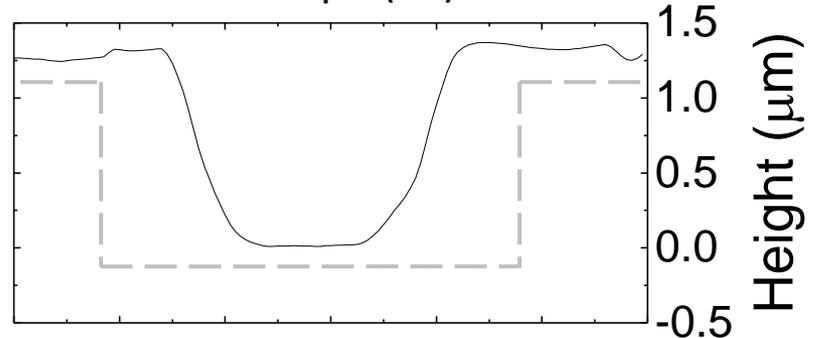
PL mapping (XY)



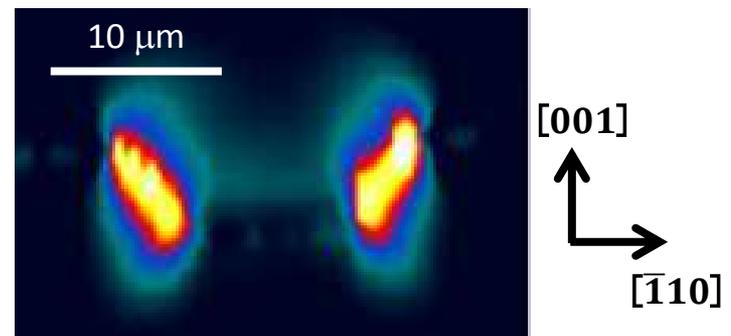
$[110]$
 $[110]$

- ✓ 溝内選択成長
- ✓ (113) 面自然形成

Laser microscope (XZ)



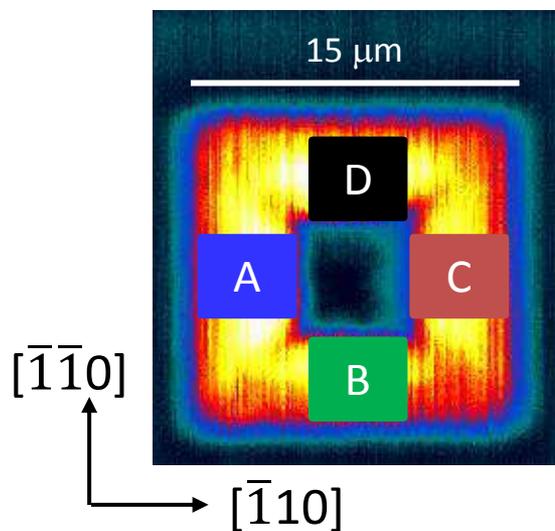
PL mapping (XZ)



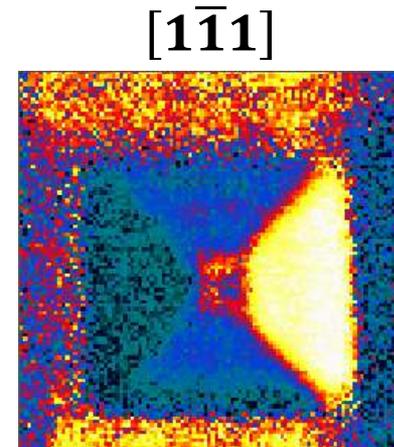
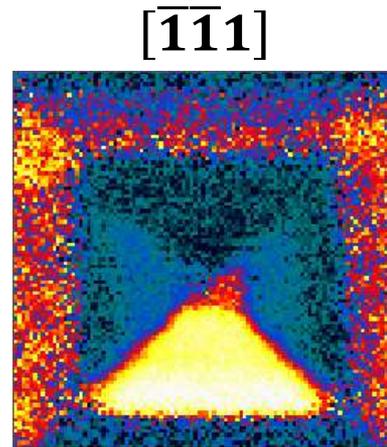
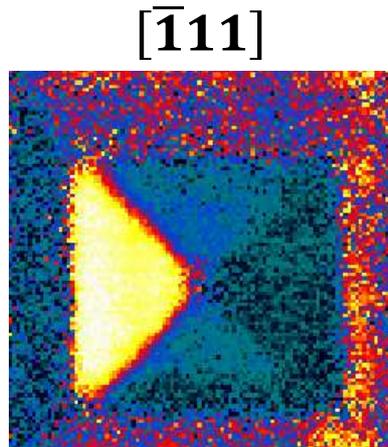
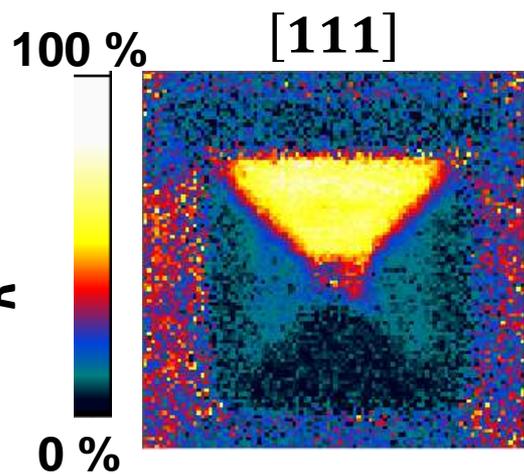
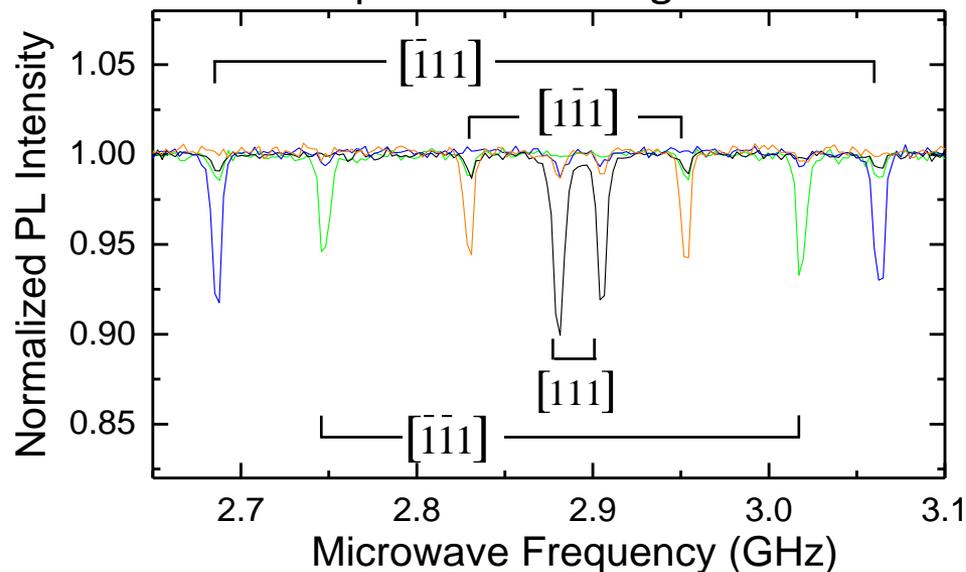
$[001]$
 $[110]$

溝構造(100)基板上CVD成長によるNV配向制御

PL mapping (XY)



ODMR spectra with magnetic field



✓ 配向方向制御

✓ 配向率 > 70 %

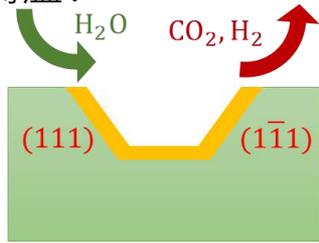
{111}逆面ピラミッド構造上CVD成長によるNV配向制御

Ni異方性エッチング + CVD成長

① Ni蒸着



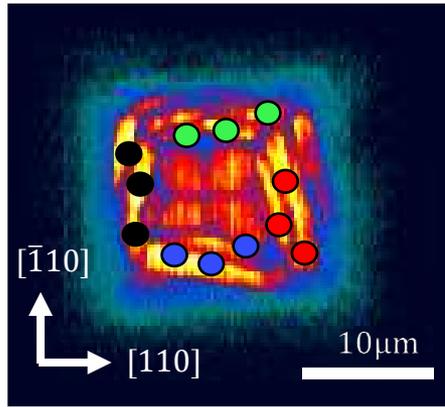
② 水蒸気雰囲気下
高温アニール



③ 熱混酸処理 + 窒素ドーピングCVD成長

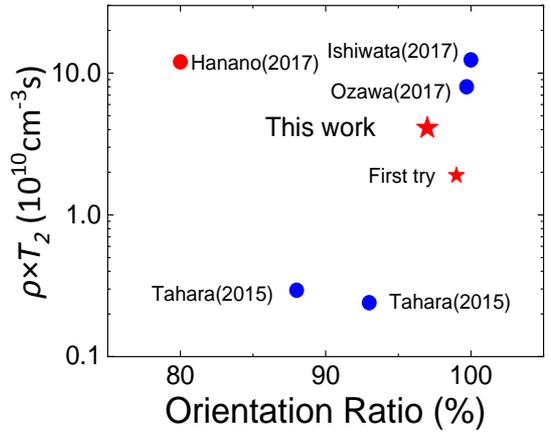
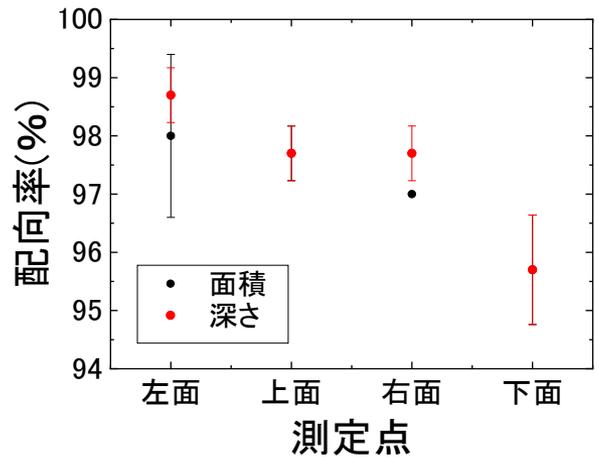
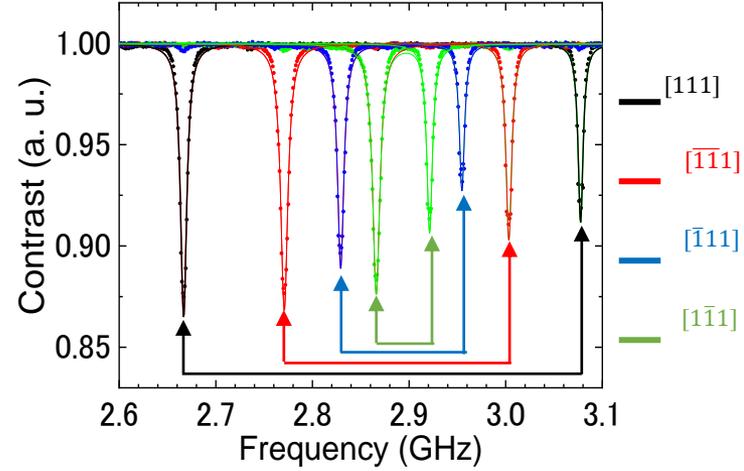


PL mapping (XY)



• $\rho = 5.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
• $T_2 = 78 \mu\text{s}$

ODMR spectra with magnetic field



✓ 配向率 > 95 % ✓ 配向方向制御

おわりに

1. スピン量子状態制御とセンシング

- 多周波数MWによる電子スピン同時制御とベクトルAC磁場センシングへの応用
- MW+RFによる電子スピン二重共鳴とCW-ODMRによるAC磁場・温度センシングへの応用

2. ダイヤモンドサンプル作製

- 窒素ドーピング同位体制御CVD成長によるNV生成
- (100)基板微細加工 + CVD成長によるNV位置・配向制御

✓ **ダイヤモンドNVセンターを用いた固体量子センサ**は、室温・大気圧下で動作する社会実装可能な量子センサの有力候補であり、**幅広い分野で革新**をもたらすことが期待される。さらなる研究開発の加速が求められる。



hayase@appi.keio.ac.jp

謝辞



慶應義塾大学

早瀬研究室

伊藤研究室, 門内博士

スピントロニクス
研究センター

Science of Hybrid
Quantum Systems

Q-LEAP 量子計測・センシング



NTT物性科学基礎研究所

齊藤博士



産業技術総合研究所 (AIST)

渡邊博士, 松崎博士



情報通信研究機構 (NICT)

赤羽博士



物質・材料研究機構 (NIMS)

寺地博士



京都大学 水落研究室



金沢大学 徳田研究室



東京大学 小林研究室



北陸先端科学技術大学院大学
安研究室