
ダイヤモンド中窒素空孔中心を用いた 電子スピン多周波制御による 温度と磁場の複合センシング

早瀬研究室 中橋 克弥

*Department of Applied Physics and Physico-Informatics,
Keio University*

Outline

1. 研究背景

- NVセンター
- 単一周波制御と多周波制御

2. 測定理論

- エネルギー準位
- ラムゼーシーケンス
- 多周波制御測定

3. 実験結果

4. まとめ

Outline

1. 研究背景

- NVセンター
- 単一周波制御と多周波制御

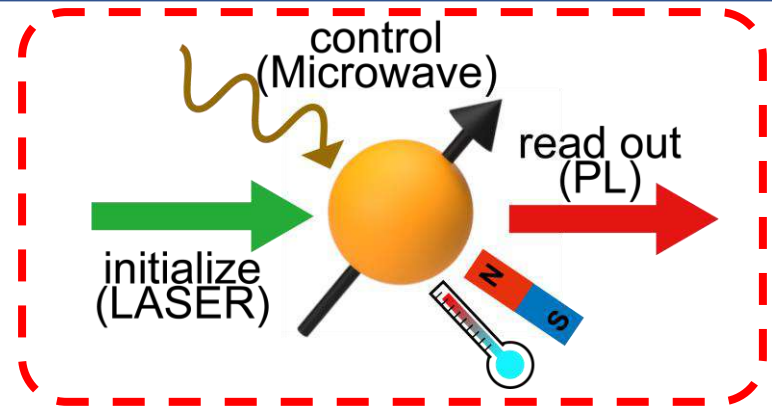
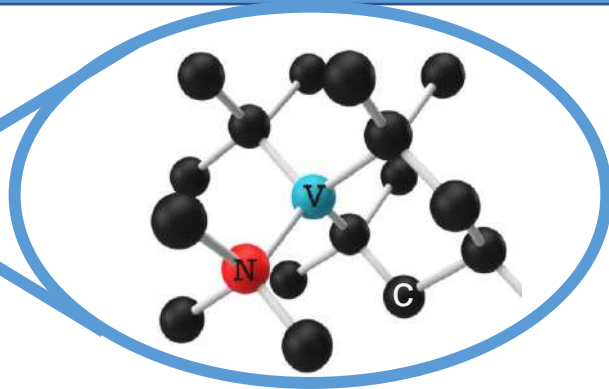
2. 測定理論

- エネルギー準位
- ラムゼーシーケンス
- 多周波制御測定

3. 実験結果

4. まとめ

窒素空孔中心(NVセンター)



Zeeman effect

Dipole interaction

Hamiltonian

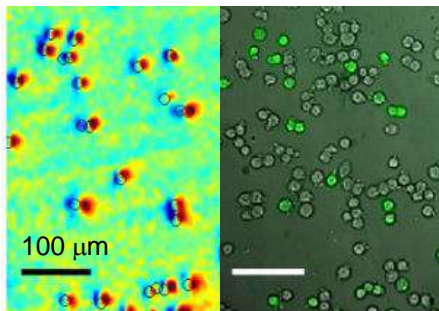
$$H \approx \underline{\gamma_e \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}} + \underline{D S_Z^2} + \underline{d E_{\perp} (S_x^2 - S_y^2)}$$

ベクトル磁場センシング

温度センシング

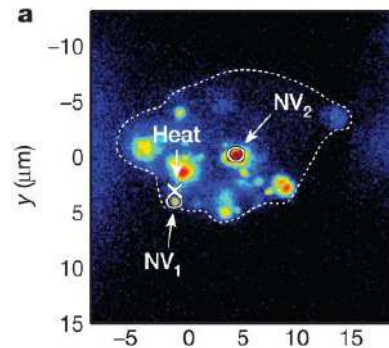
電場センシング

磁場センシング



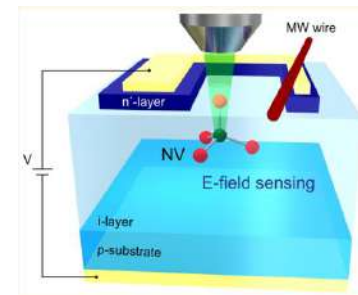
Glenn *et al.*, Nat Methods, **12** 736 (2015).

温度センシング



Kucsko *et al.*, Nature, **500** 54 (2013).

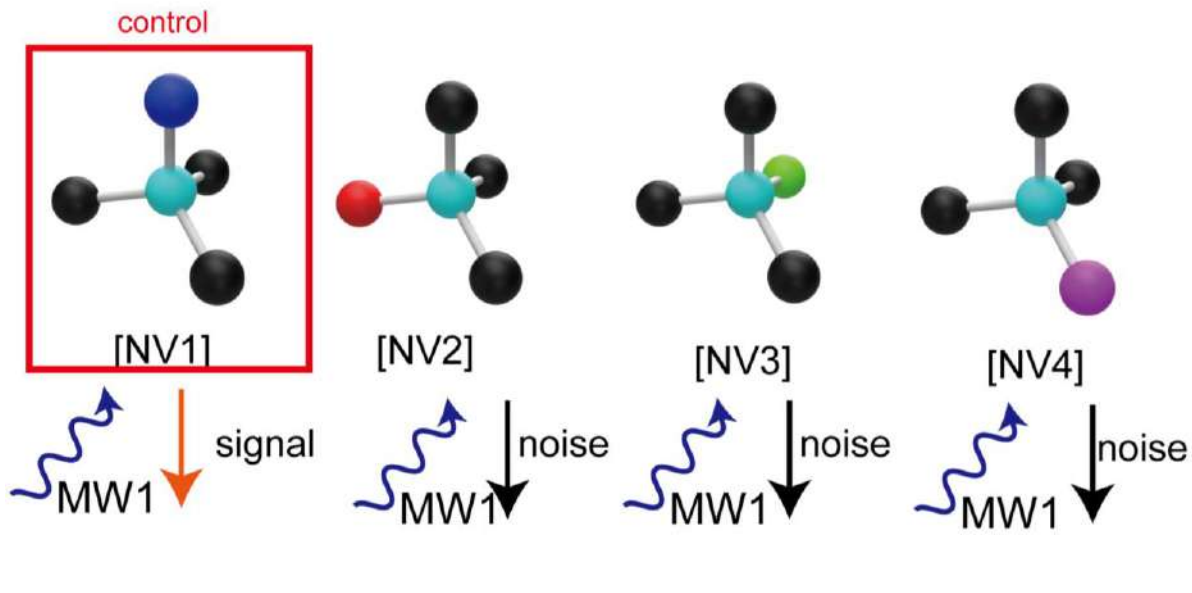
電場センシング



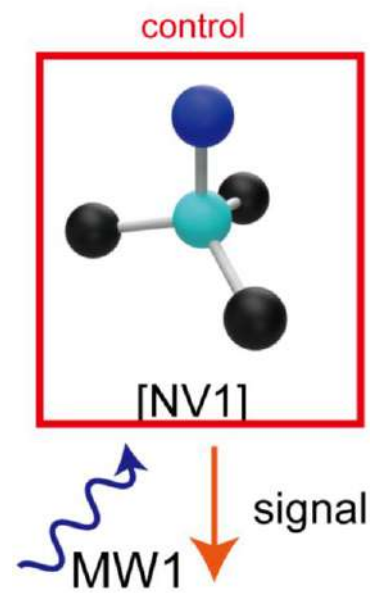
Iwasaki *et al.*, ACS nano, **11** 1238 (2017).

単一周波制御センシング

4配向サンプル



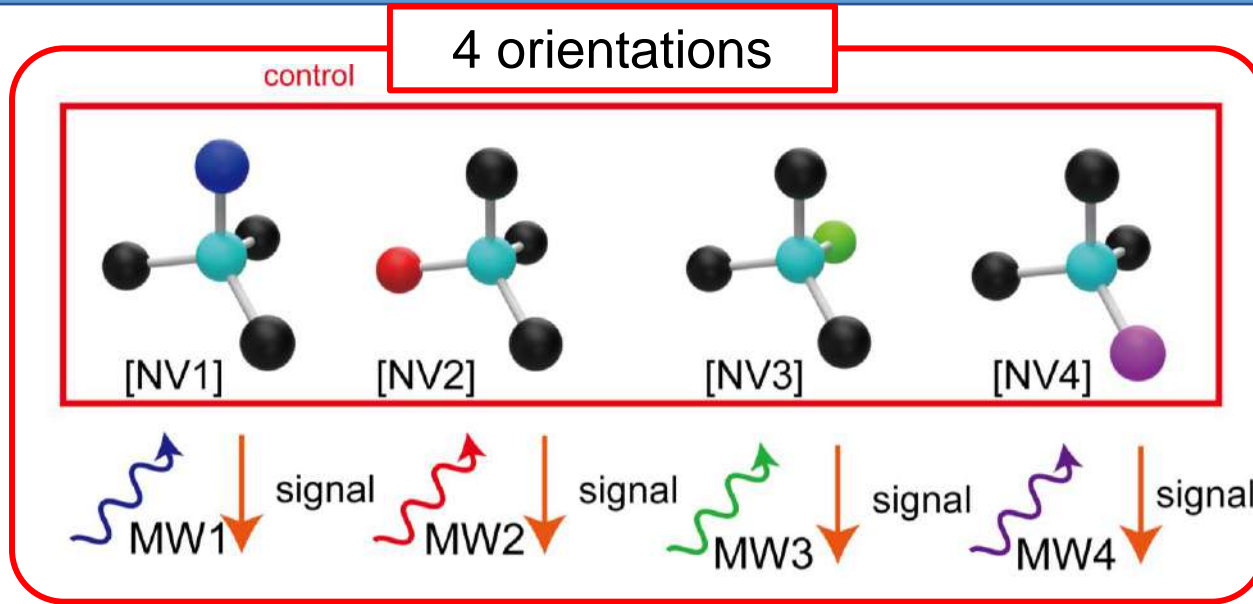
1 配向サンプル



単一周波制御センシング

4 配向	NV 配向	1 配向
▲	ベクトル磁場測定	×
▲	温度測定	○

多周波制御センシング



単一周波制御センシング			多周波制御センシング
4 配向	1 配向	NV 配向	4 配向
▲	×	ベクトル磁場 センシング	○
▲	○	温度センシング	○

Research Purpose

多周波制御センシングを用いた温度とベクトル磁場の複合測定

Outline

1. 研究背景

- ・NVセンター
- ・単一周波制御と多周波制御

2. 測定理論

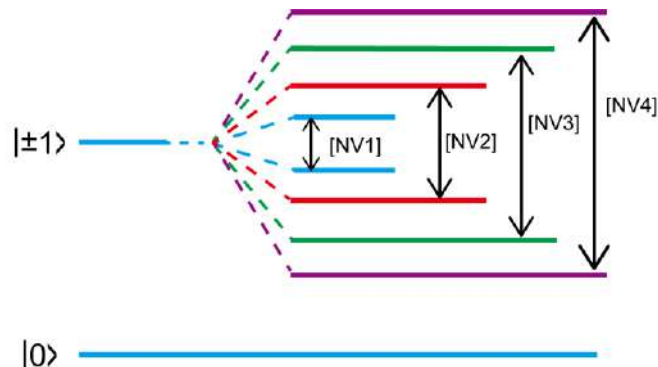
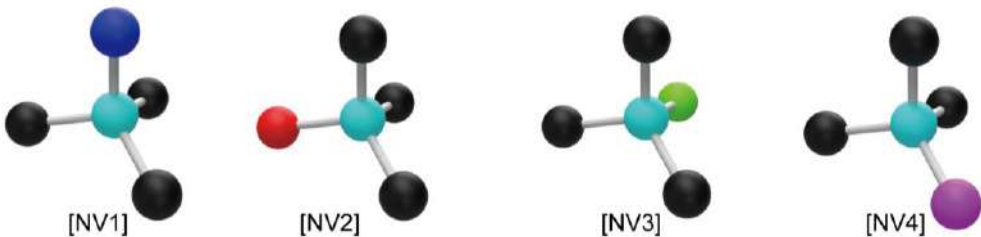
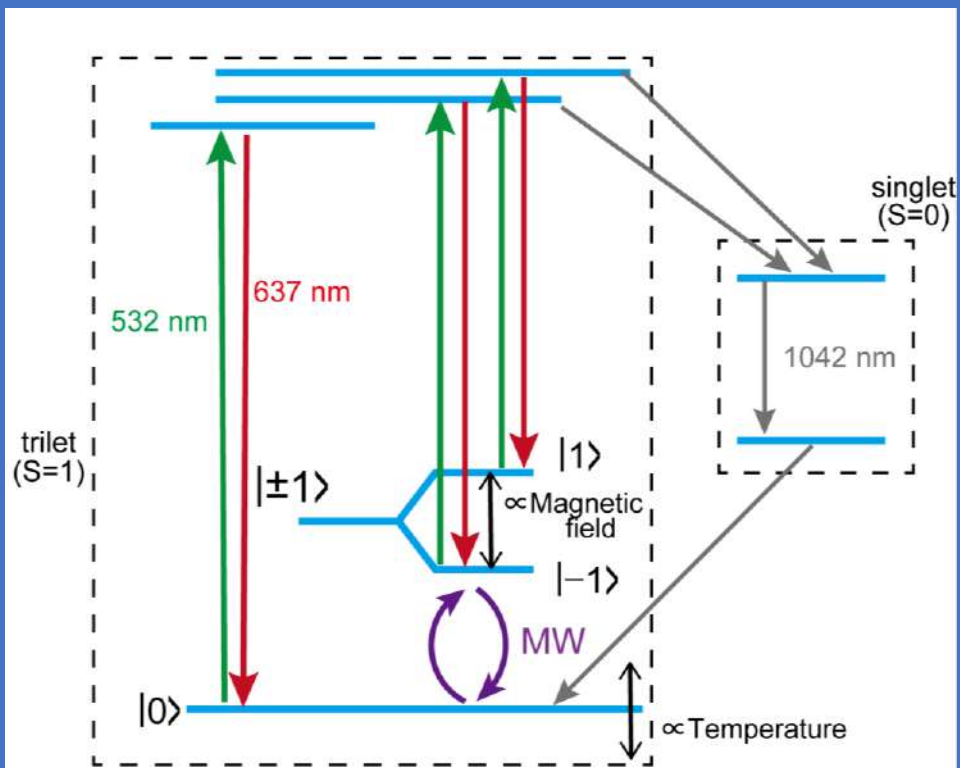
- ・エネルギー準位
- ・ラムゼーシーケンス
- ・多周波制御測定

3. 実験結果

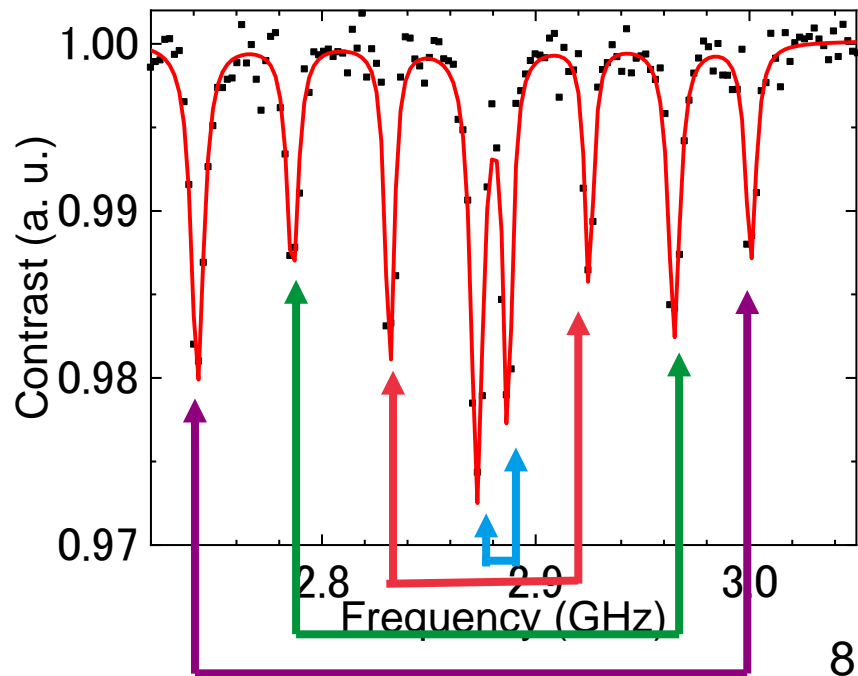
4. まとめ

NVセンターのエネルギー準位

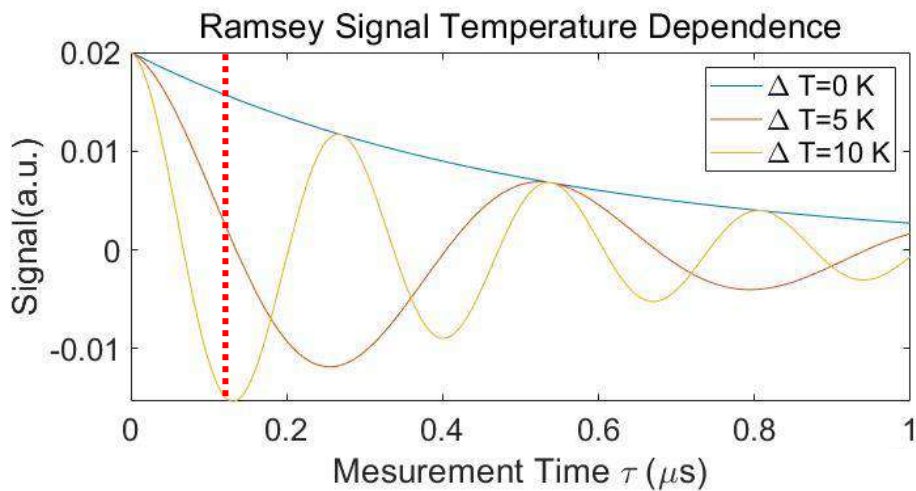
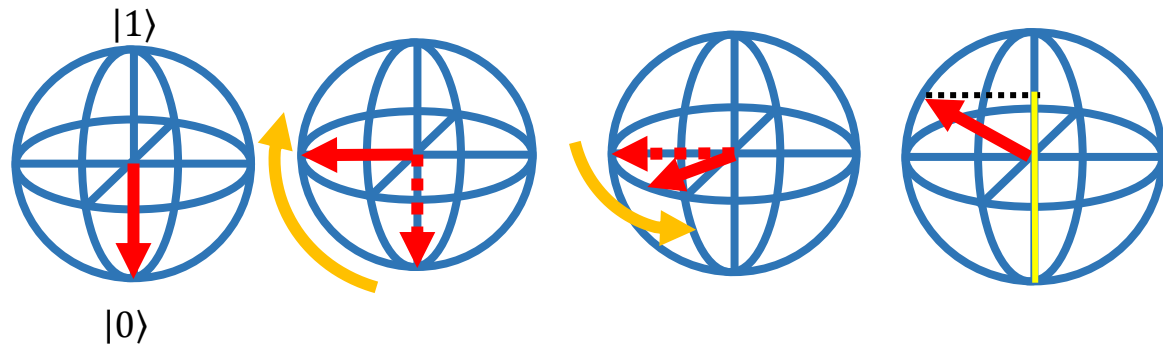
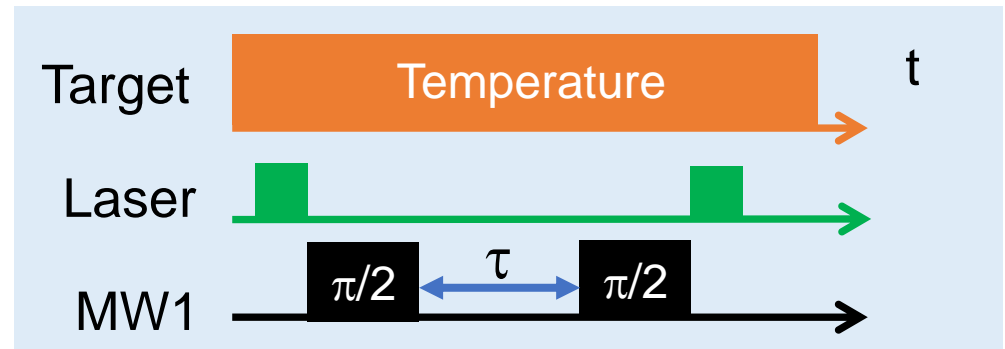
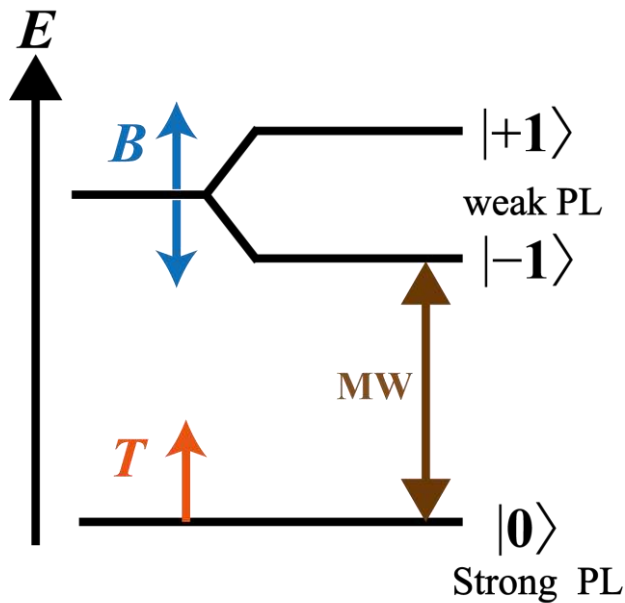
エネルギー準位



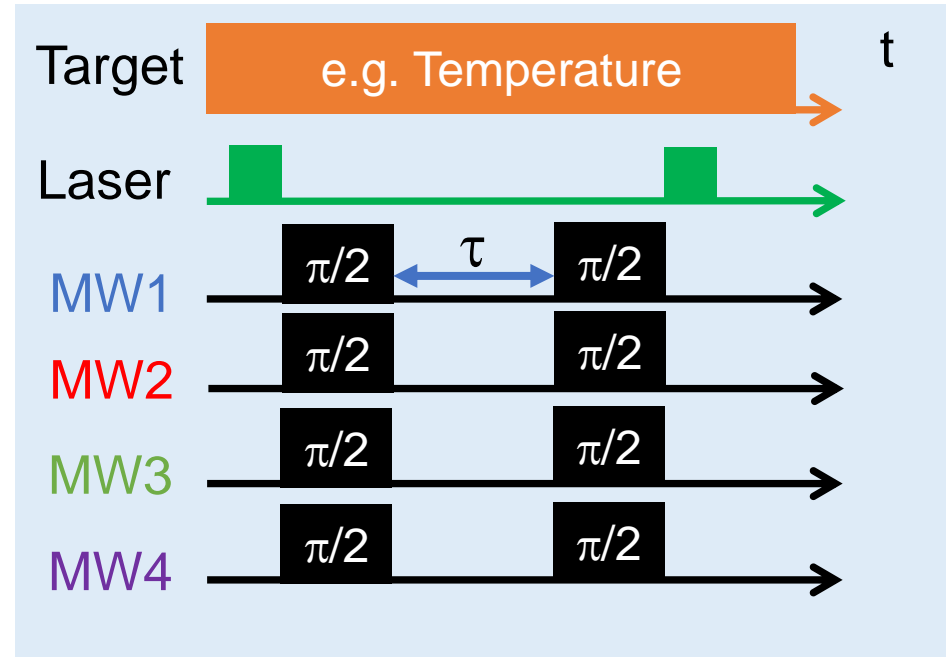
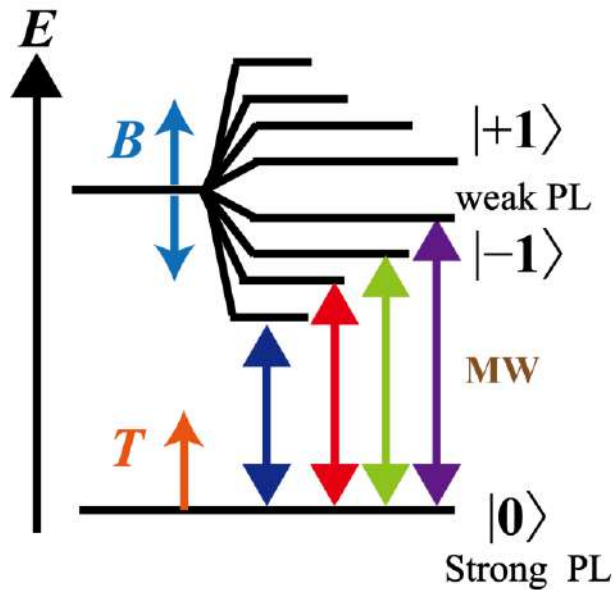
共鳴周波数測定



NVセンターを用いた温度センシング



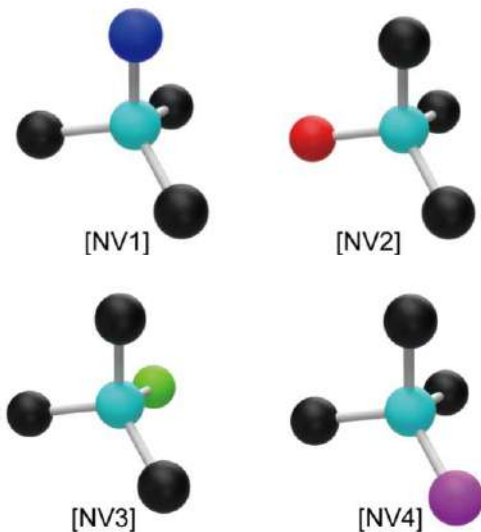
多周波での温度センシング



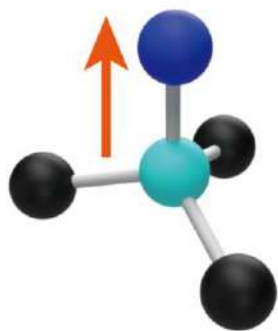
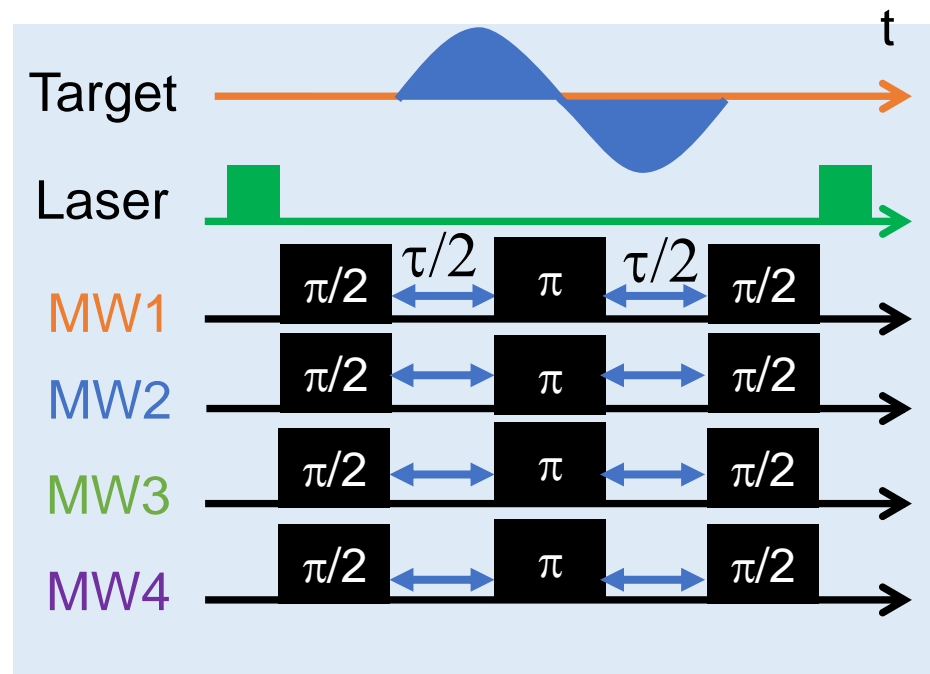
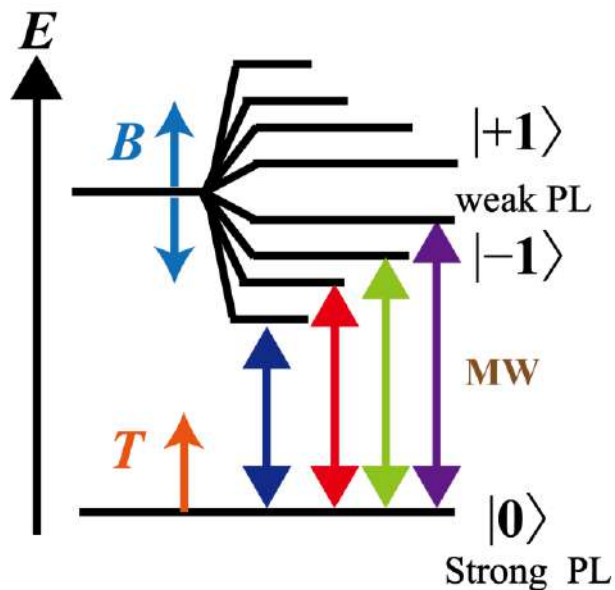
Sensitivity(η) rate(sample with same orientation)

$$\frac{\eta_{\text{single}}}{\eta_{\text{multi}}} = 2\sqrt{2}$$

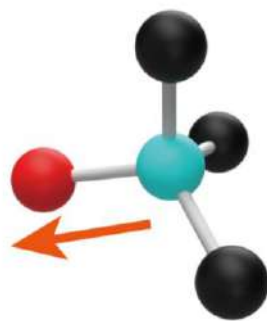
Katsuya.n, the 81st JSAP Autumn Meeting, Japan (2020)



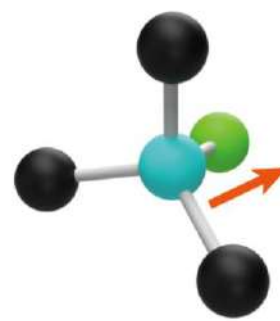
多周波での交流磁場センシング



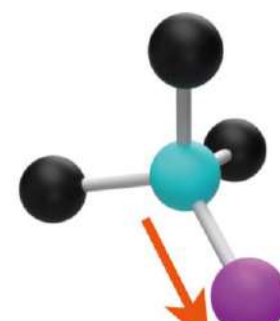
$[-1 \ 1 \ 1]$



$[1 \ -1 \ 1]$

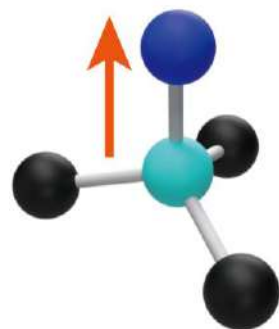
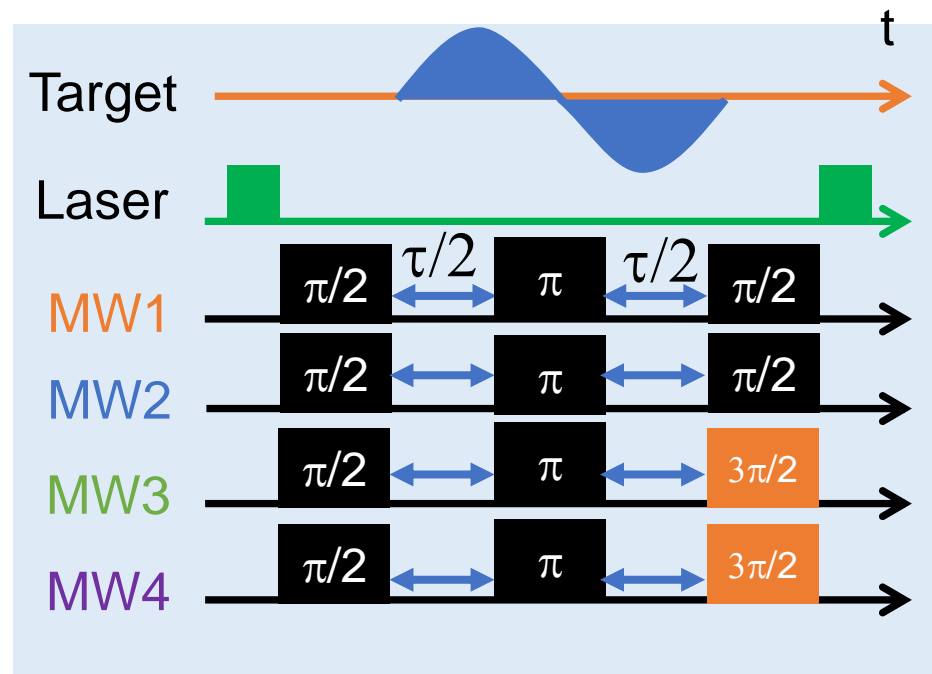
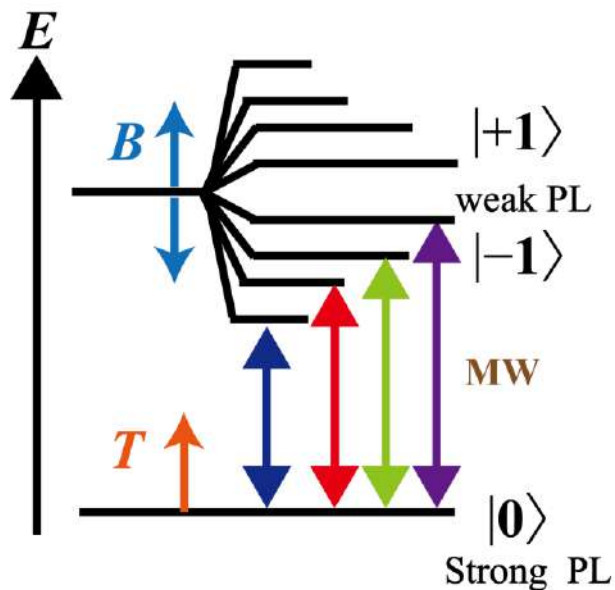


$[1 \ 1 \ -1]$

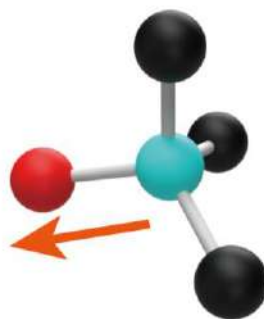


$[-1 \ -1 \ -1]$

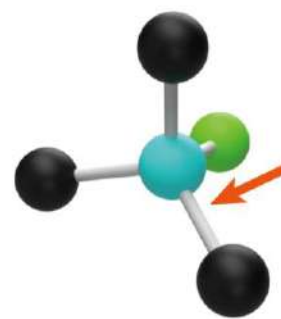
多周波での交流磁場センシング



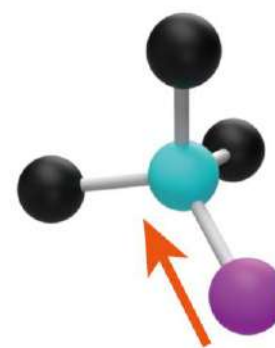
$[-1 \ 1 \ 1]$



$[1 \ -1 \ 1]$

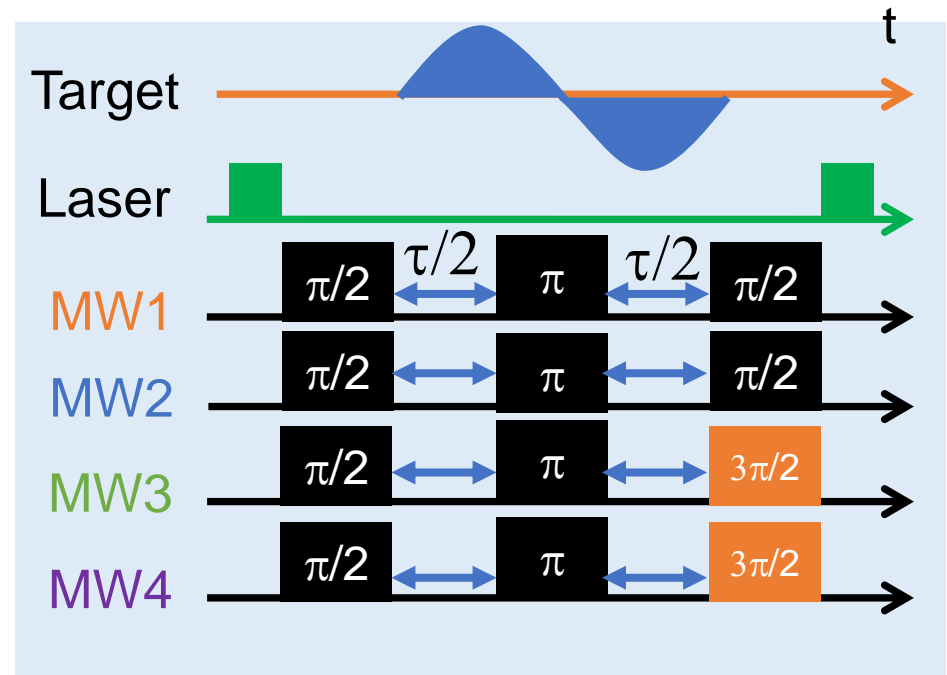
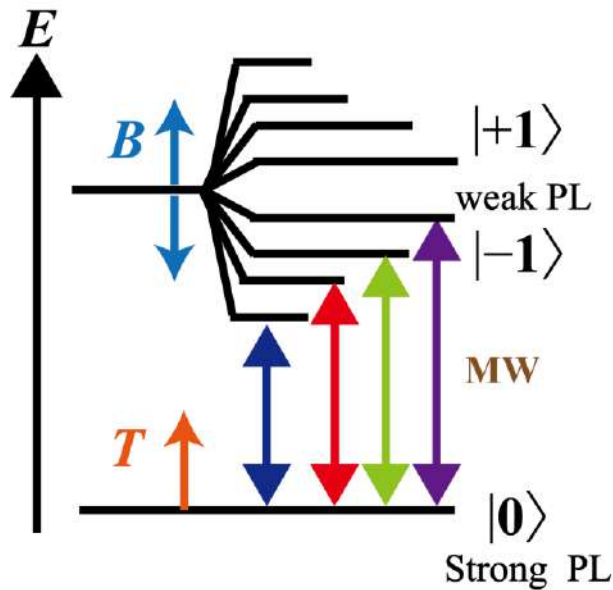


$[-1 \ -1 \ 1]$



$[1 \ 1 \ 1]$

多周波での交流磁場センシング



	Sequence	Target
ラムゼー	$\pi/2$ τ $\pi/2$	DC Mag. Temperature
スピン エコー	$\pi/2$ $\tau/2$ π $\tau/2$ $\pi/2$	AC Mag.

Outline

1. 研究背景

- NVセンター
- 単一周波制御と多周波制御

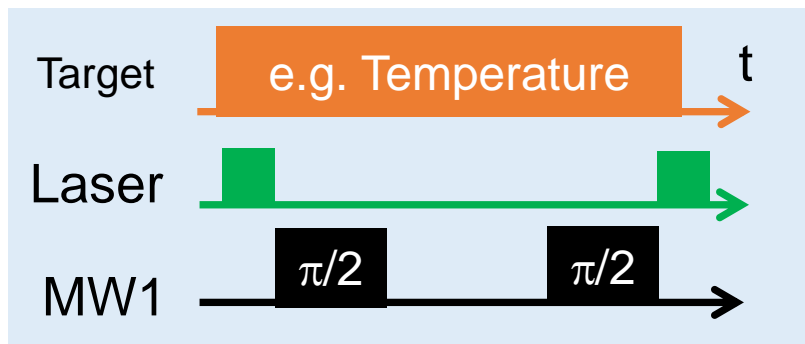
2. 測定理論

- エネルギー準位
- ラムゼーシーケンス
- 多周波制御測定

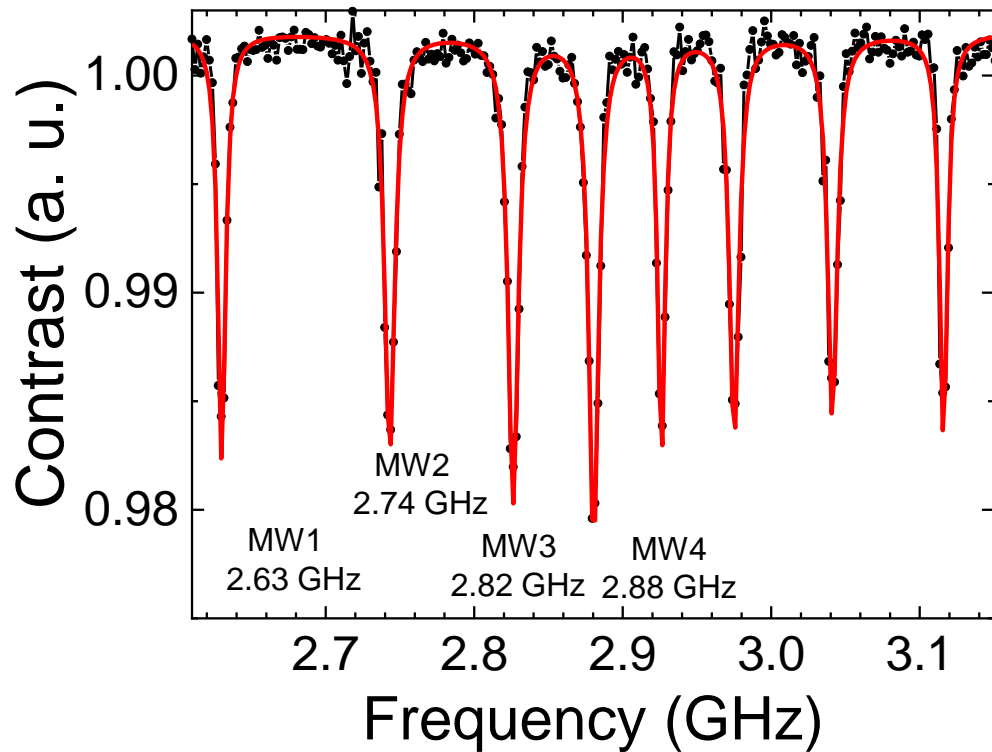
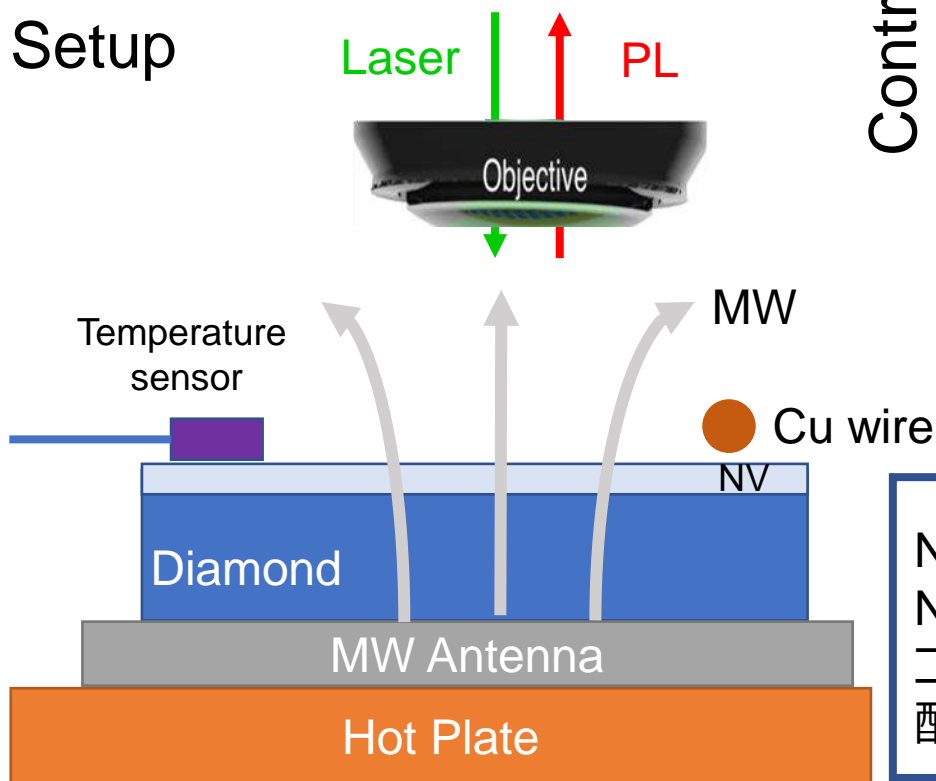
3. 実験結果

4. まとめ

実験系



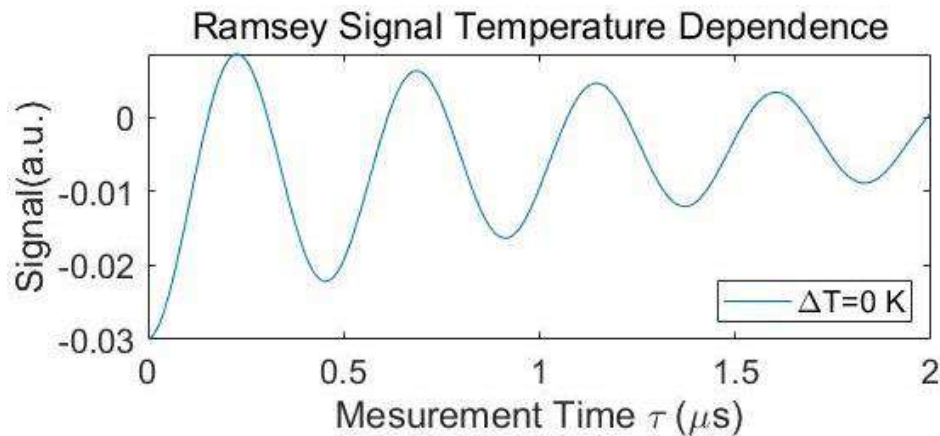
Setup



Sample

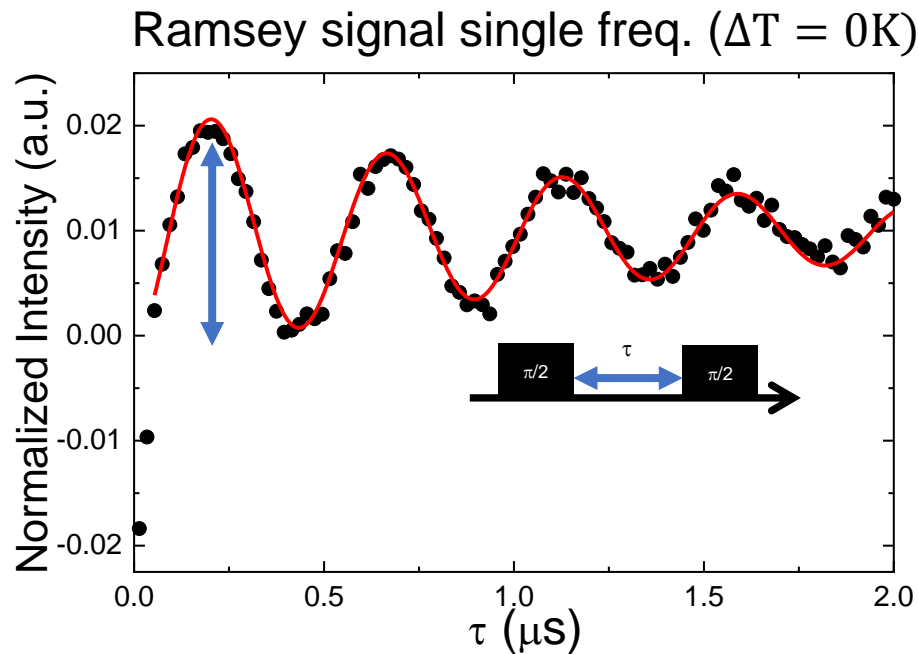
N-doped CVD + Heイオン注入 + Annealing
 NV 密度: $2.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 コヒーレンス時間: $T_2 = 20 \mu\text{s}$
 配向率: 35% : 29% : 21% : 15%

ラムゼー干渉測定

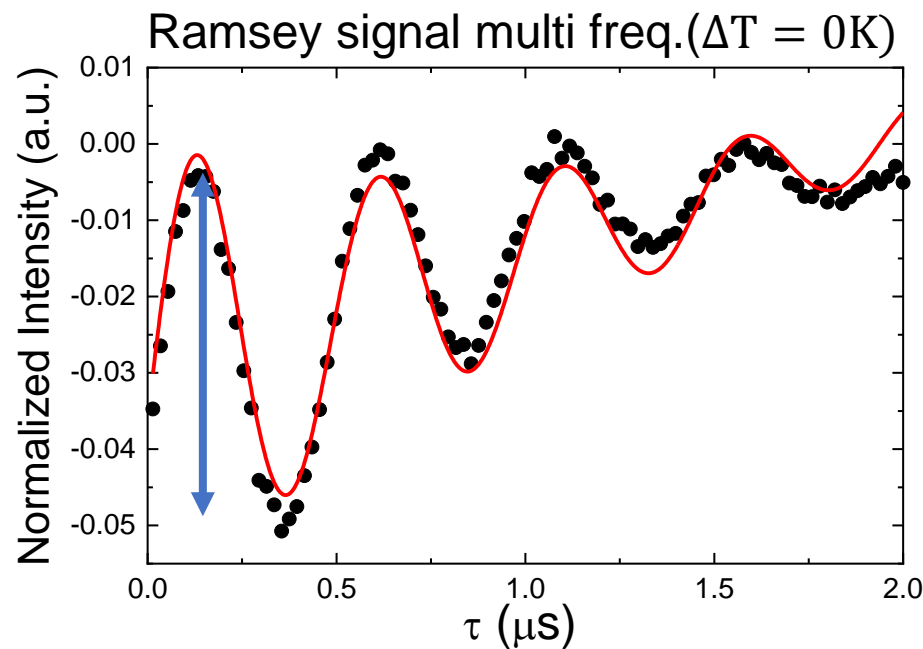


Intensity rate

$$\frac{I_{\text{multi}}}{I_{\text{single}}} = 2.5$$



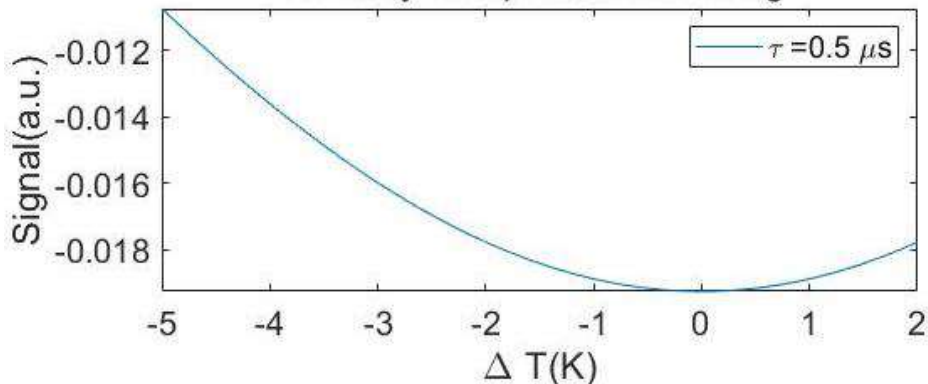
Coherence time : $T_2^* = 1.30 \mu\text{s}$



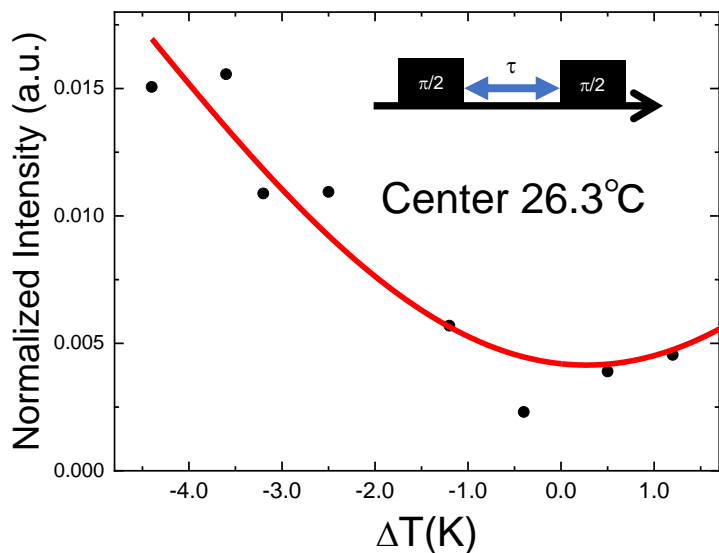
Coherence time : $T_2^* = 0.97 \mu\text{s}$

温度センシング

Ramsey Temperature Sensing



Temperature sensing single freq. ($\tau = 0.5 \mu\text{s}$)



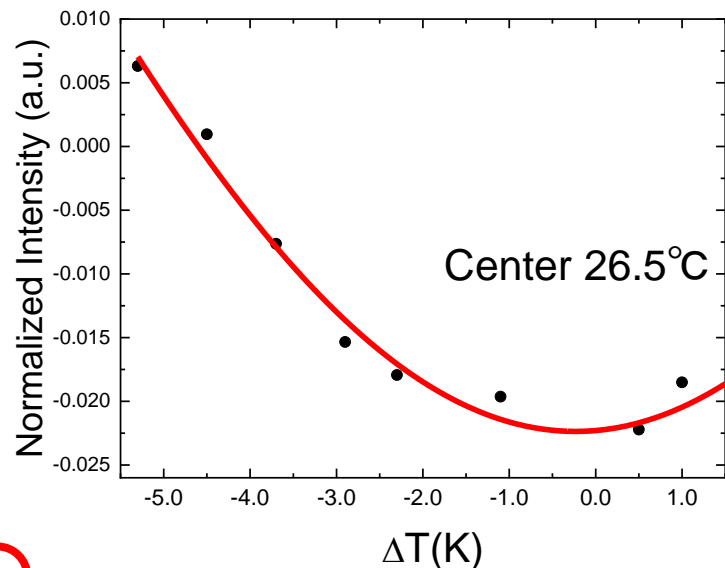
Sensitivity 242 mK/ $\sqrt{\text{Hz}}$

$$\frac{\eta_{\text{single}}}{\eta_{\text{multi}}} > 1.8$$

Theoretical

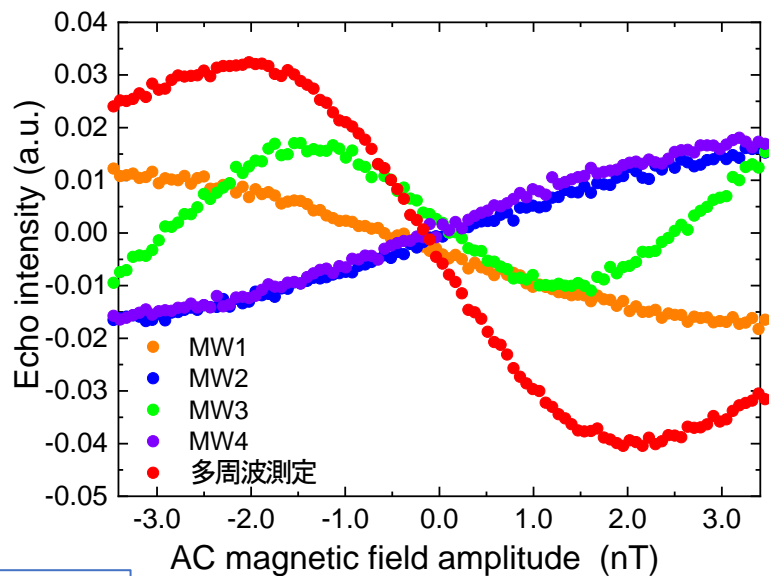
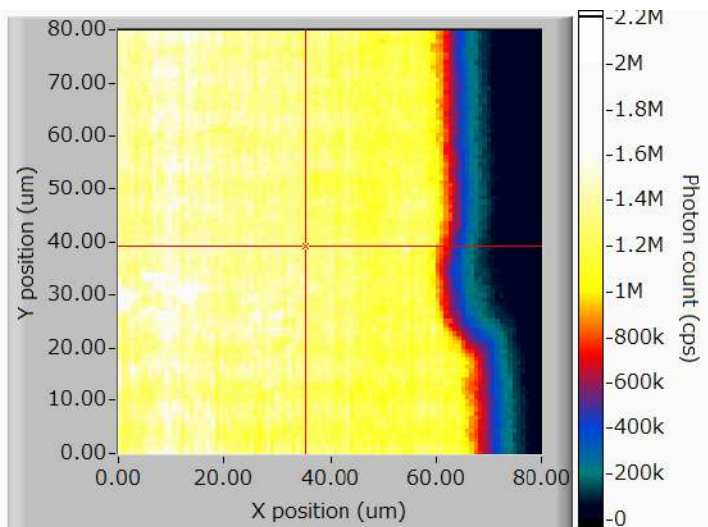
$$\frac{\eta_{\text{single}}}{\eta_{\text{multi}}} > 2\sqrt{2} \cong 2.8$$

Temperature sensing multi freq. ($\tau = 0.5 \mu\text{s}$)



Sensitivity 134 mK/ $\sqrt{\text{Hz}}$

交流磁場センシング



Sensitivity

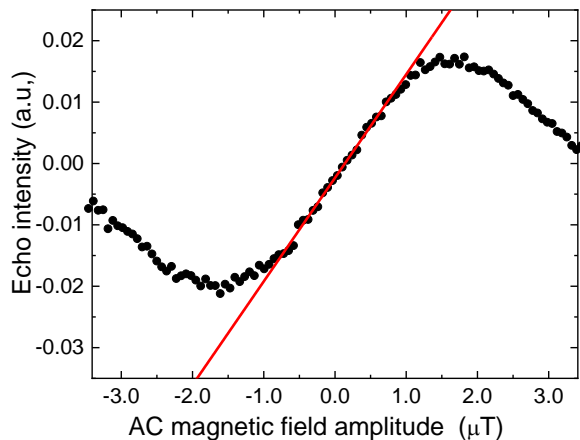
MW1	625 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
MW2	474 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
MW3	684 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
MW4	581 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Multi 177 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$

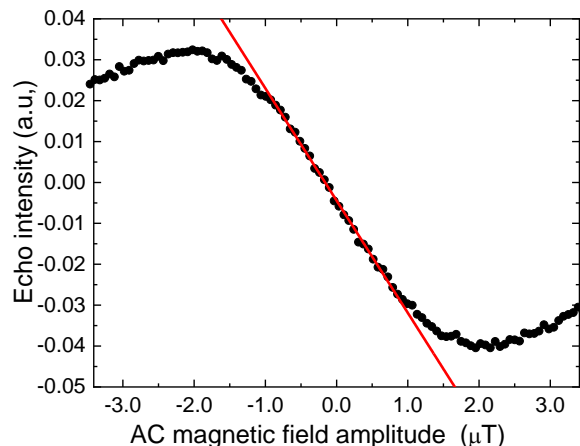
$$\frac{\eta_{\text{single}}}{\eta_{\text{multi}}} > 2.67$$

ベクトル磁場測定

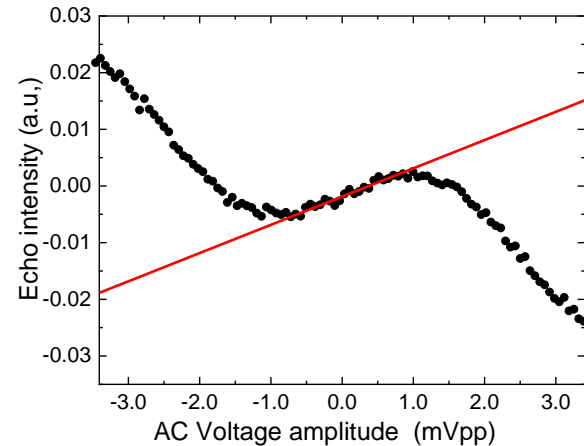
X方向



Y方向



Z方向



NV1 [1 -1 -1]

NV2 [-1 1 -1]

NV3 [-1 -1 1]

NV4 [1 1 1]

に対して 磁場ベクトル [3.4 -5.5 1]

ベクトル磁場測定

Outline

1. 研究背景

- ・NVセンター
- ・単一周波制御と多周波制御

2. 測定理論

- ・エネルギー準位
- ・ラムゼーシーケンス
- ・多周波制御測定

3. 実験結果

4. まとめ

まとめ

研究目的

多周波制御センシングを用いた 温度とベクトル磁場の複合測定

結論

- 温度測定系を構築し、温度センシングにおいて多周波制御が単一周波制御に比べ高感度になることを実証した。
- 同一セットアップによって温度と磁場の複合センシングを行った。

展望

- より高感度な測定が可能なシーケンスを用いて評価を行う
- 磁場と温度が同時に印加された時の影響の評価を行う