

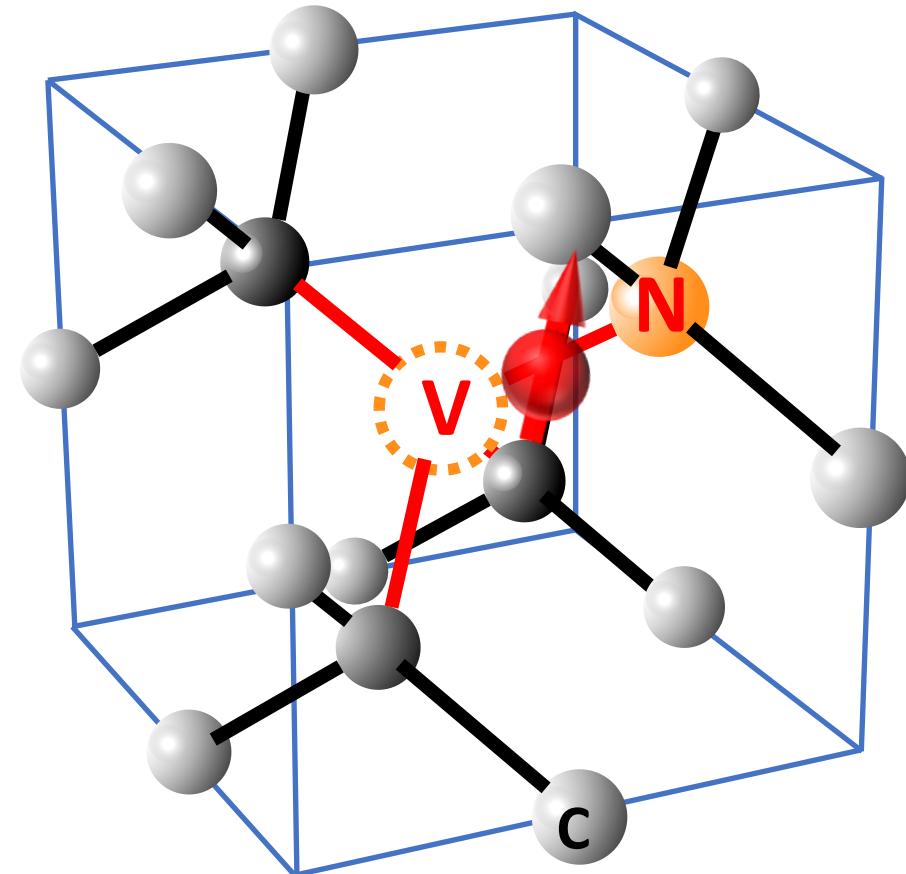
JST新技術説明会

磁気・生命現象の僅かな変化を捉える
超高感度量子センサ

2025/09/04

金沢大学 ナノマテリアル研究所
省エネデバイス開発グループ
林 寛

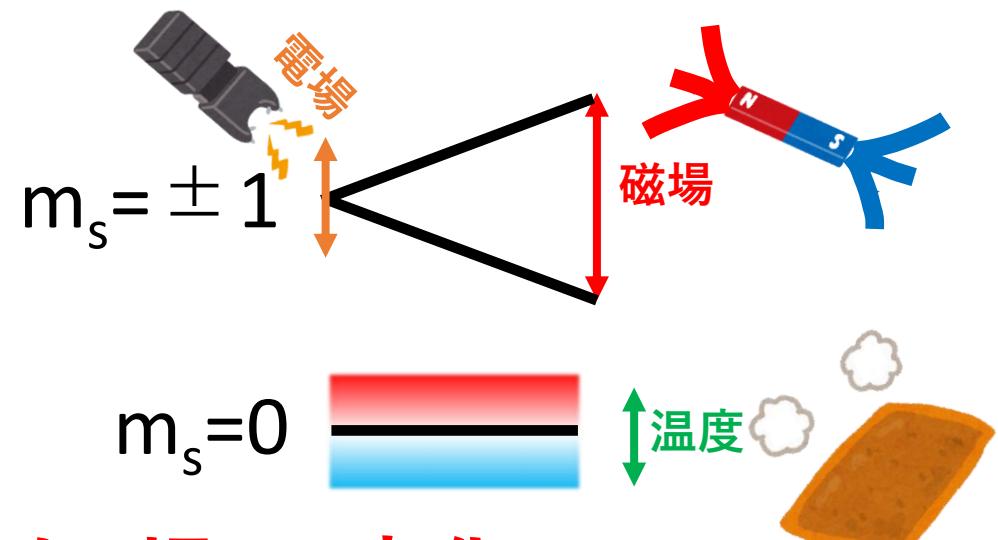
窒素-空孔ペア(NV センター)



$S=1$ の電子スピンが局在

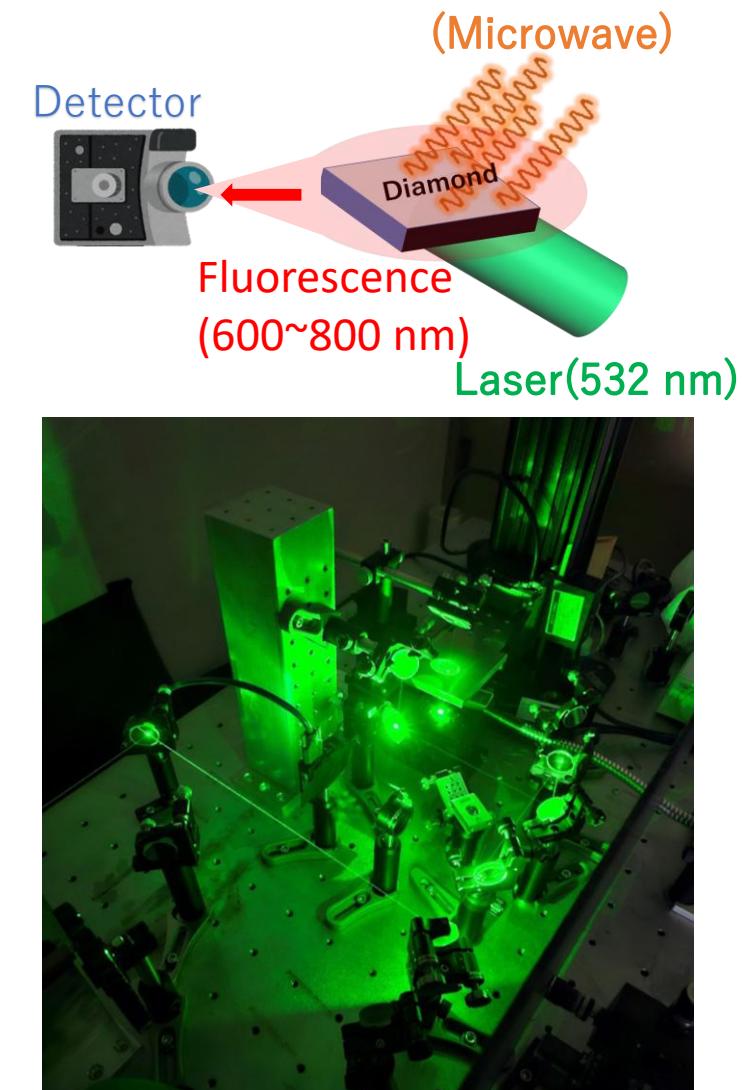
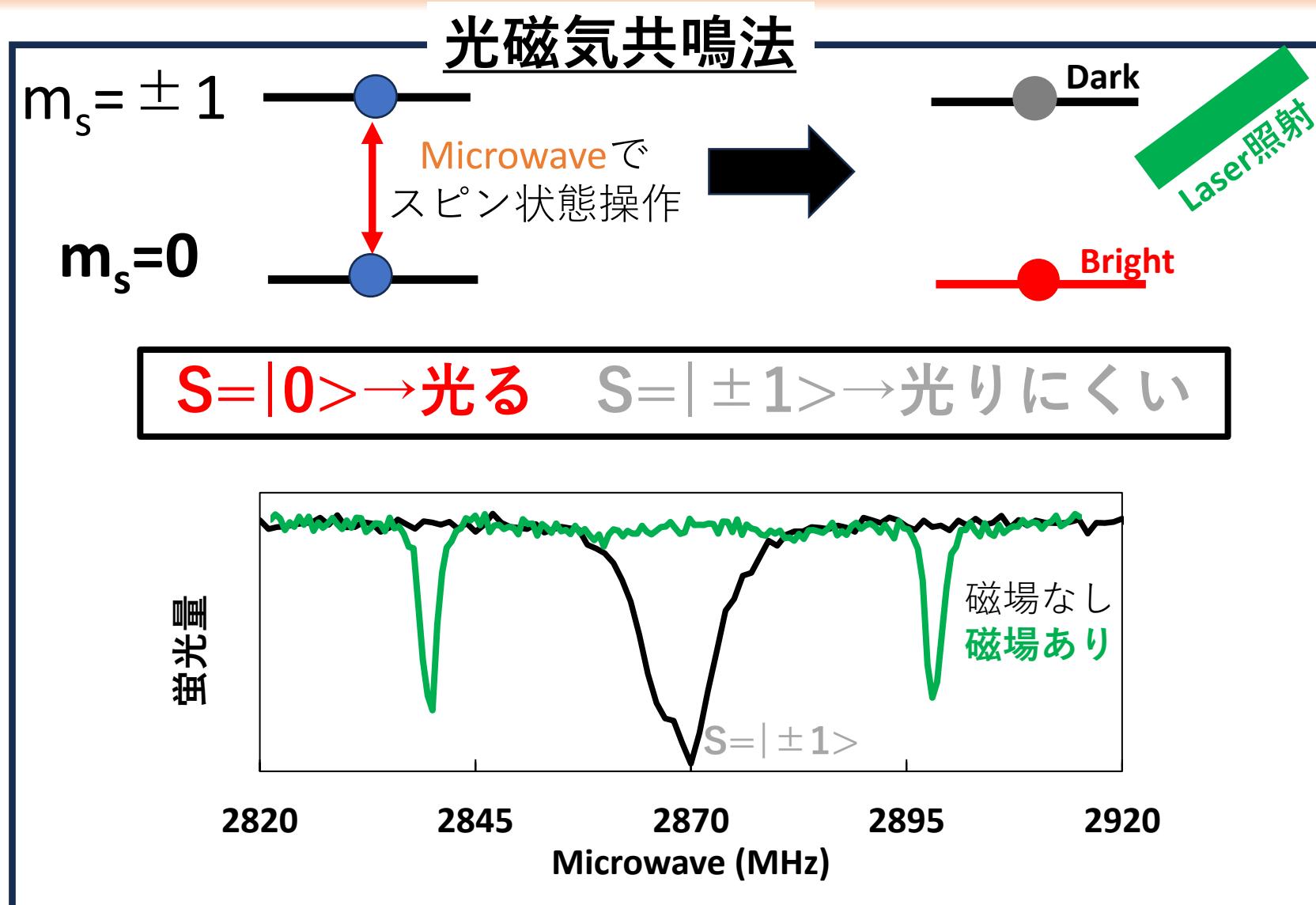
- ・環境に対する安定性
ダイヤモンドの特性
- ・nm~mmの幅広い空間分解能
ナノダイヤ~インチダイヤ
- ・様々な“場”的測定が可能
NVセンターの電子スピン特性

電子スピン状態



電子スピン状態が様々な”場”で変化

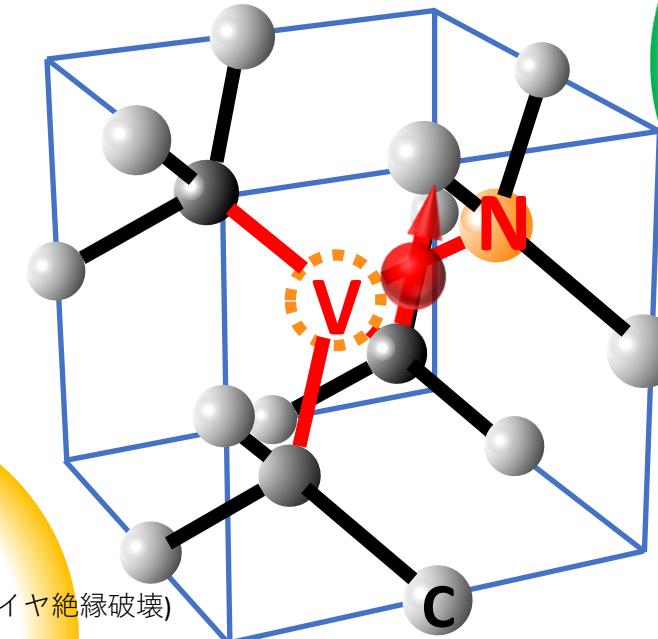
測定手法



ダイヤモンドの蛍光量変化からスピニン状態=場を測定する

量子センサ

磁場^{[3][4]}
0~8 T
分解能: 最小~300 fT
(DC, mmスケール)
周波数DC~THz



温度^{[1][2]}
-120~300 °C
分解能~mK(室温)

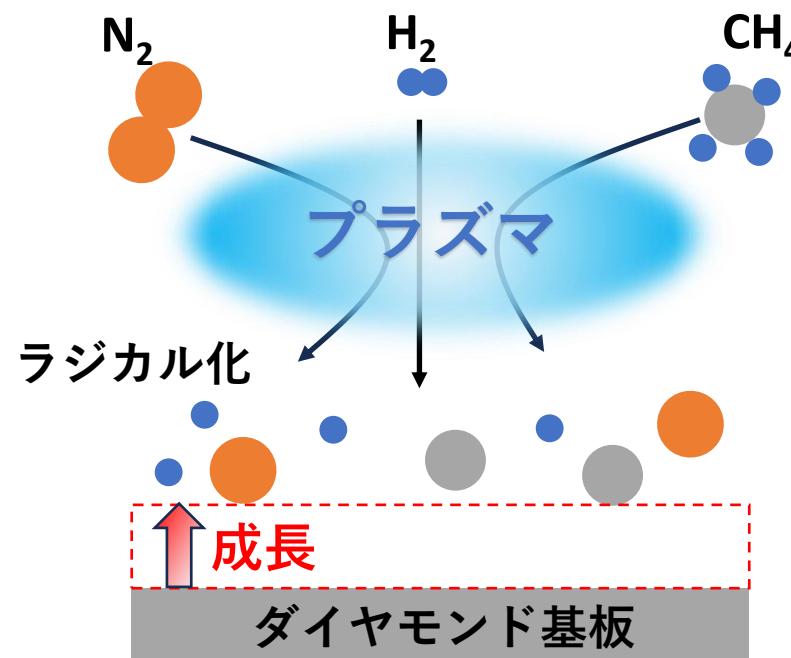
電場^{[5][6]}
0~数 MV?_(ダイヤ絶縁破壊)
分解能: 最小~0.1 V/cm
(DC, mmスケール)
周波数DC~MHz

圧力^[7]
大気圧~130 GPa
分解能~MPa(室温)

環境耐性を備えた高感度ハイブリットセンサ

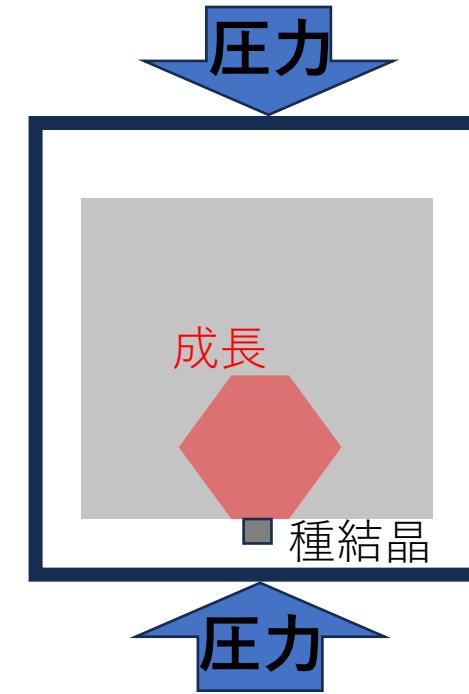
ダイヤモンド合成法

プラズマ化学気相堆積(CVD法)



薄膜&局所的にダイヤモンド層を作る方法

高温高压法(HPHT法)



大きなダイヤモンド結晶を作製する方法

パターニングやデバイス→CVDが主な作製法

量子センサの感度

センサー感度の式

$$dS_{\min} = \frac{\sqrt{\langle \delta P^2 \rangle}}{\max |\frac{\partial P}{\partial S}| \cdot \sqrt{n_{NV}TV}}$$

スピンノイズ NV数

P : 信号強度
 n_{NV} : NVセンター濃度
 S : 測定対象の値
 V : 測定体積
 T : 積算時間

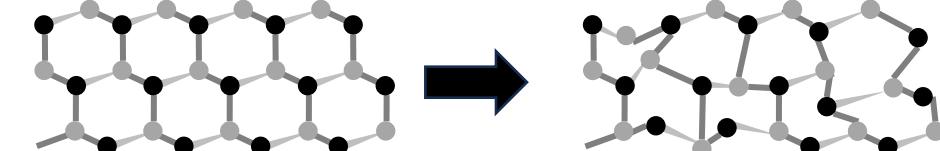
スピンノイズ源

・磁気ノイズ



NV?
窒素原子?

・歪みノイズ

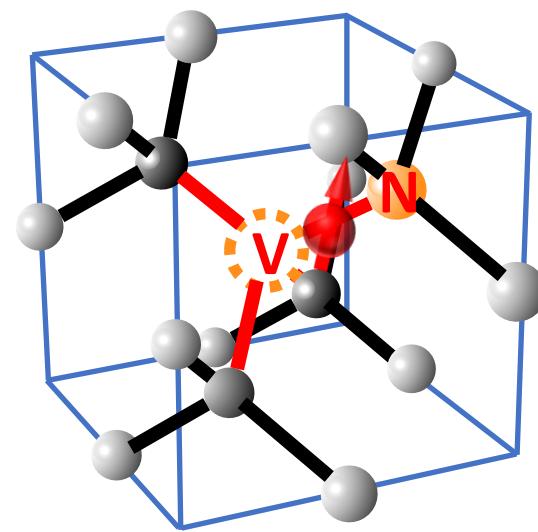


NVセンターや、その元となる窒素原子(P1センター)もノイズ源

できるだけノイズ源を減らし、NVセンターを作る事が重要

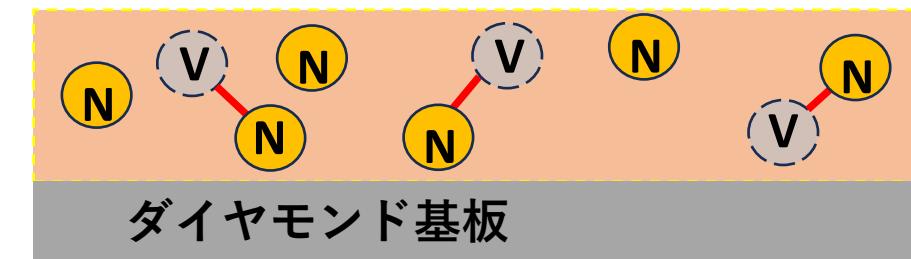
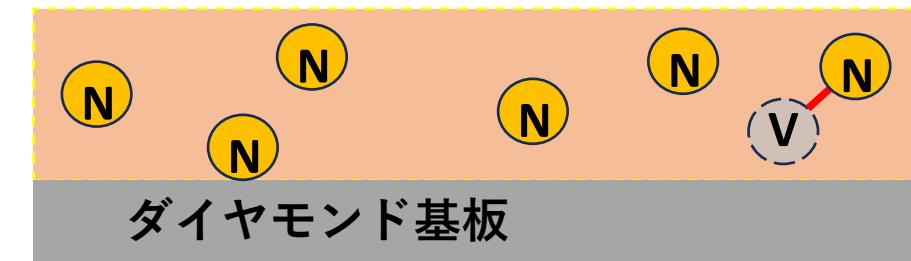
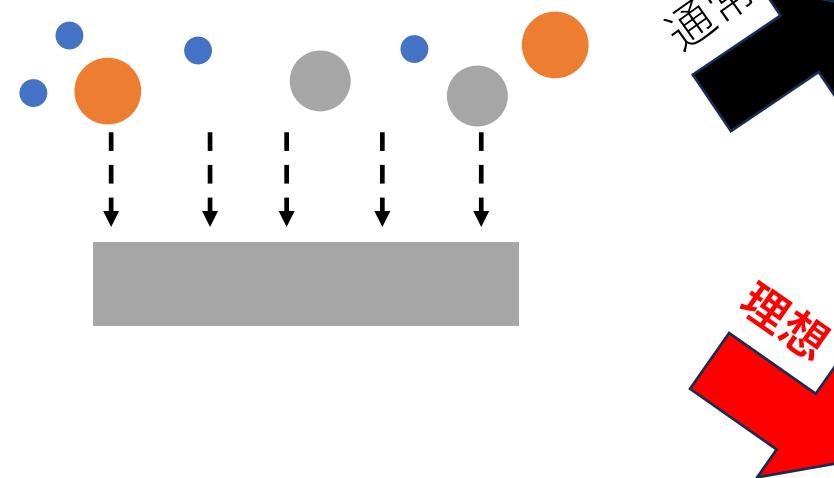
CVDダイヤモンドの課題

CVD法:置換窒素(P1センター)のNVセンターへの生成効率が20%未満



窒素と空孔欠陥が隣り同士

CVD成長



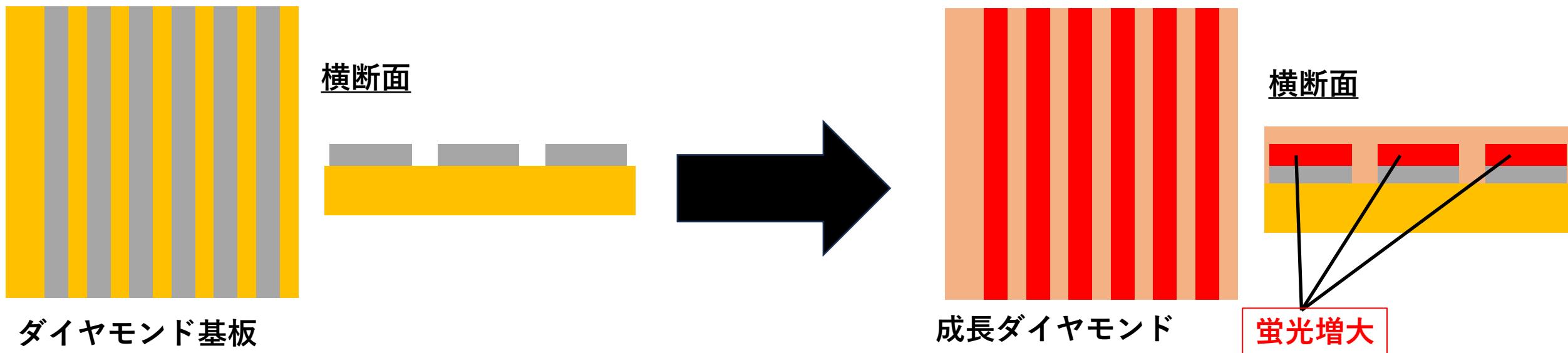
成長時に空孔導入が必要

先行研究: 金属上へのCVD成膜

金属(Ti:5μ/Pt:10μ/Au:20μ)ストライプパターンを形成し金属上にダイヤモンド成長

S. Zhang et. al., Carbon, 198, 392(2022).

金属ストライプパターン



金属上に成長した多結晶層から单結晶層への空孔導入により
NV濃度が**6倍**に増大

さらなる空孔欠陥導入を狙える金属は？？

先行研究の比較

	蛍光増大	カーバイド化	結晶構造	金属上 Overgrowth
Diamond		-	FCC	-
W	~10倍	○(～600°C)	HCP (WC)	△ (100) (ひび割れ)
Au	6倍	×	FCC	○(100)
Ti	?	○(<430°C)	FCC (TiC)	○? (本発表)

Ti→Crackのないダイヤモンド & 蛍光増大が狙えると期待

本紹介の技術内容

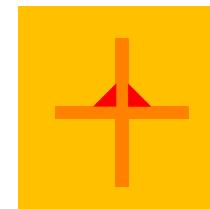
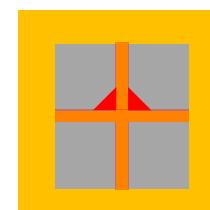
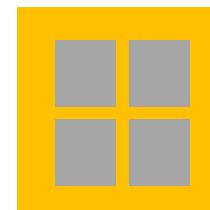
Tiを用いたダイヤモンドへの空孔導入



先行研究：金属上のみ空孔導入 & 量子センサ濃度増大(1のみ)
本技術:①だけでなく金属間(②)も蛍光増大

実験手法

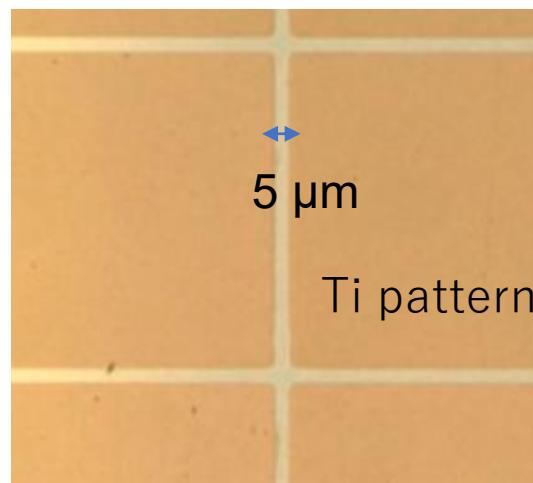
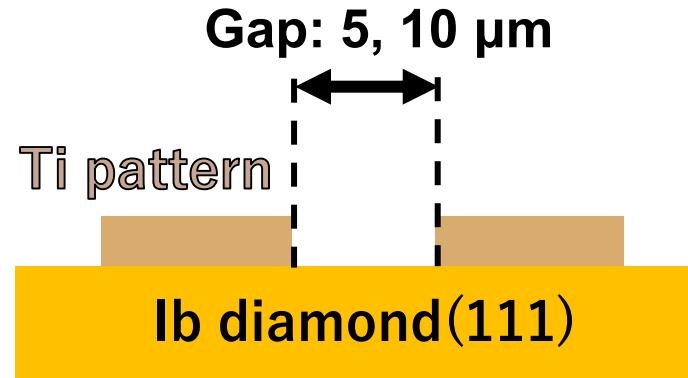
1. 基板洗净(熱混酸)
2. フォトリソグラフィー
3. 真空蒸着(Ti : 50nm)
4. CVD成長
5. Tiパターン除去(熱混酸)
6. 評価(レーザー顕微鏡, 蛍光測定, ODMR)



実験結果: レーザー顕微鏡像(成長後)

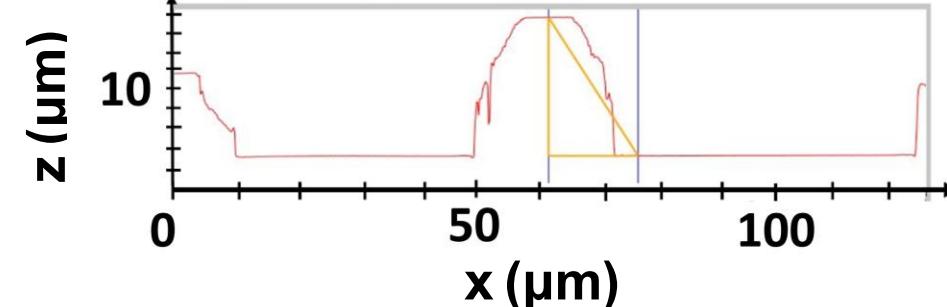
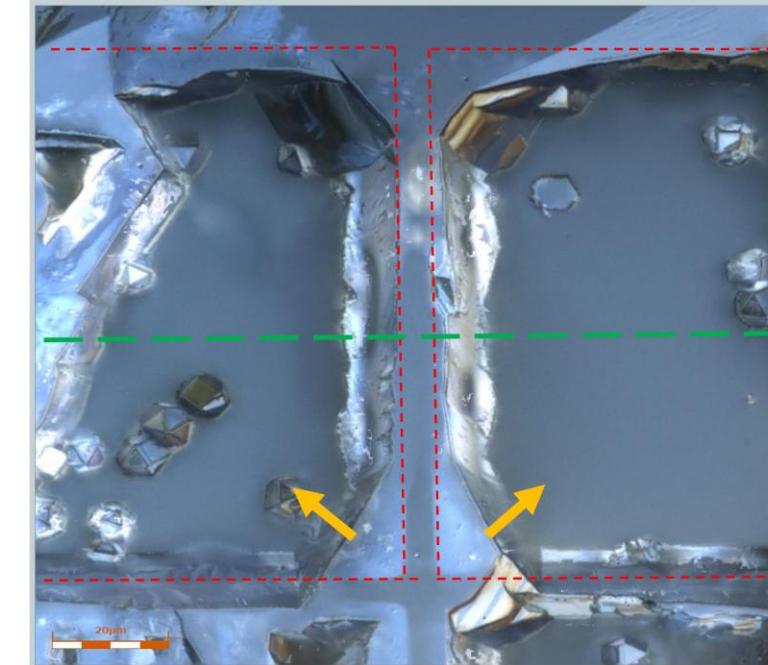
・CVD成長

前



50 μm

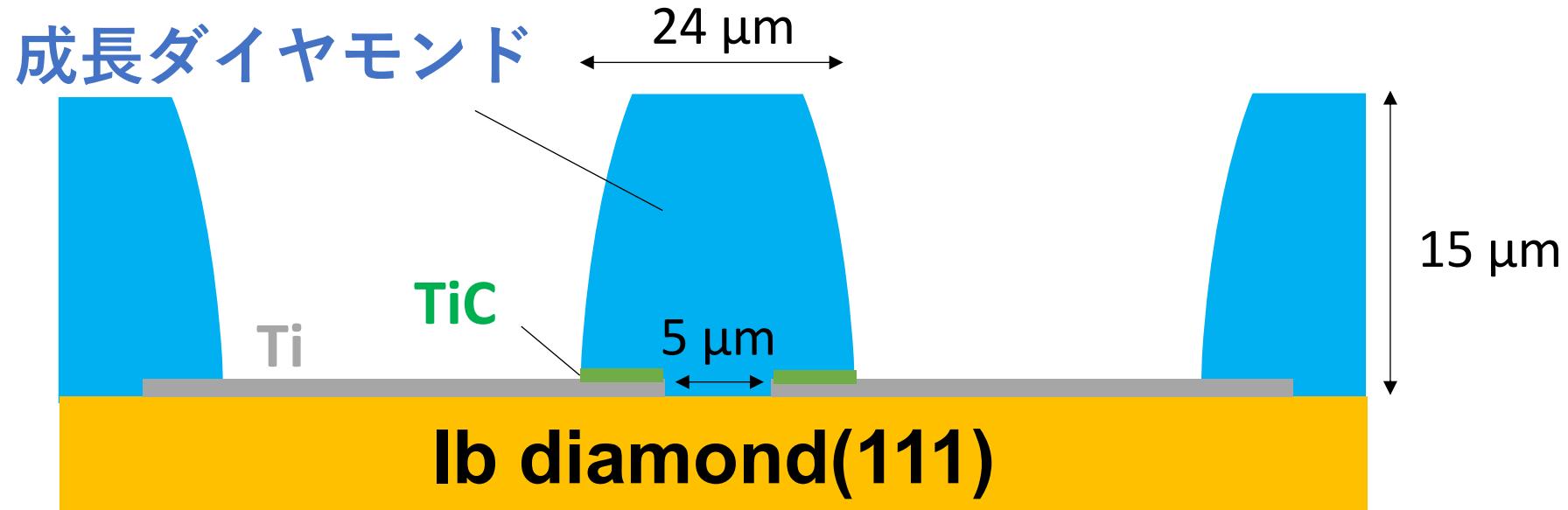
・CVD成長(Ti除去後)



Tiパターン間からダイヤモンドが成長

成長模式図

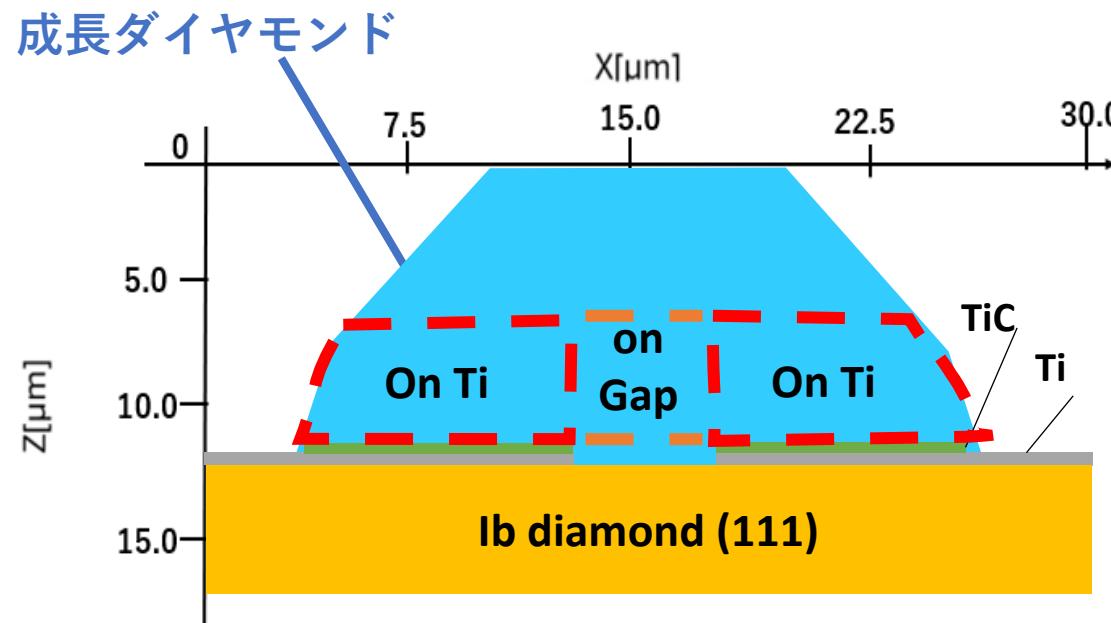
断面模式図



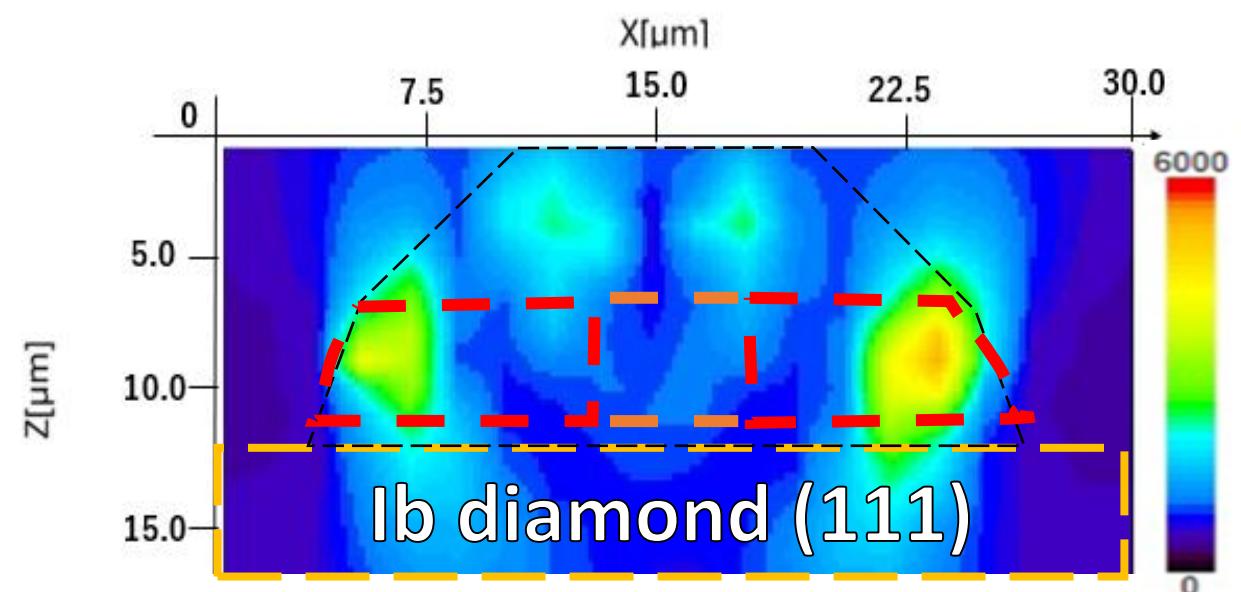
Tiパターン間からTi上を覆うように成長
→Ti上でNV蛍光が増大していると期待

NVセンター蛍光マップ(637 nm)

模式図

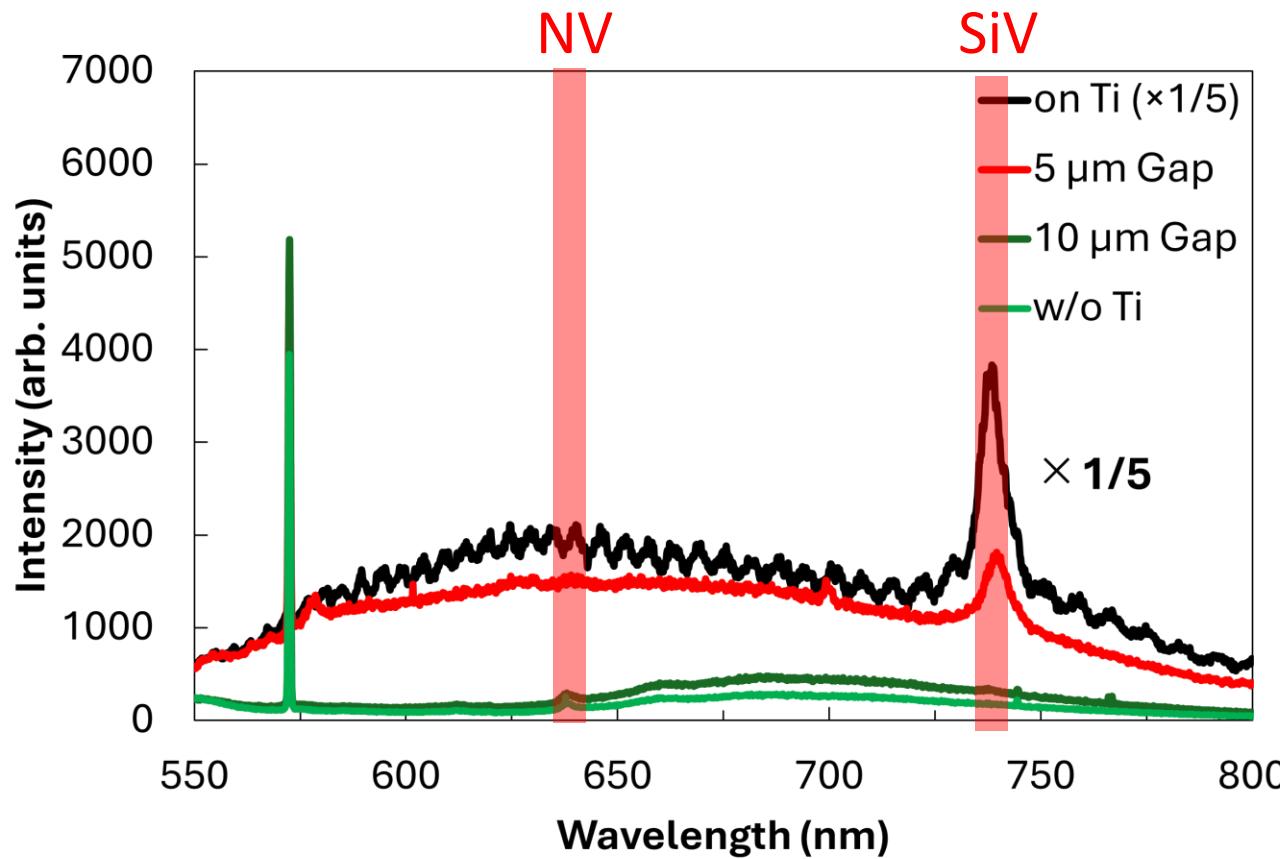


蛍光マップ



Ti上(On Ti)、とTiパターン間(Gap)両方で
蛍光増大を確認

フォトルミネッセンス結果



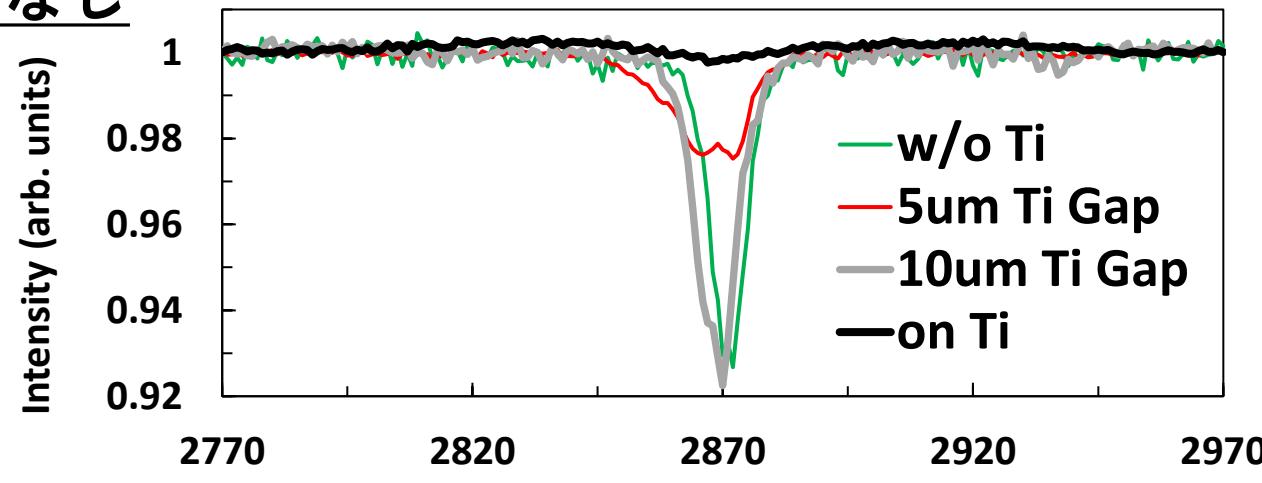
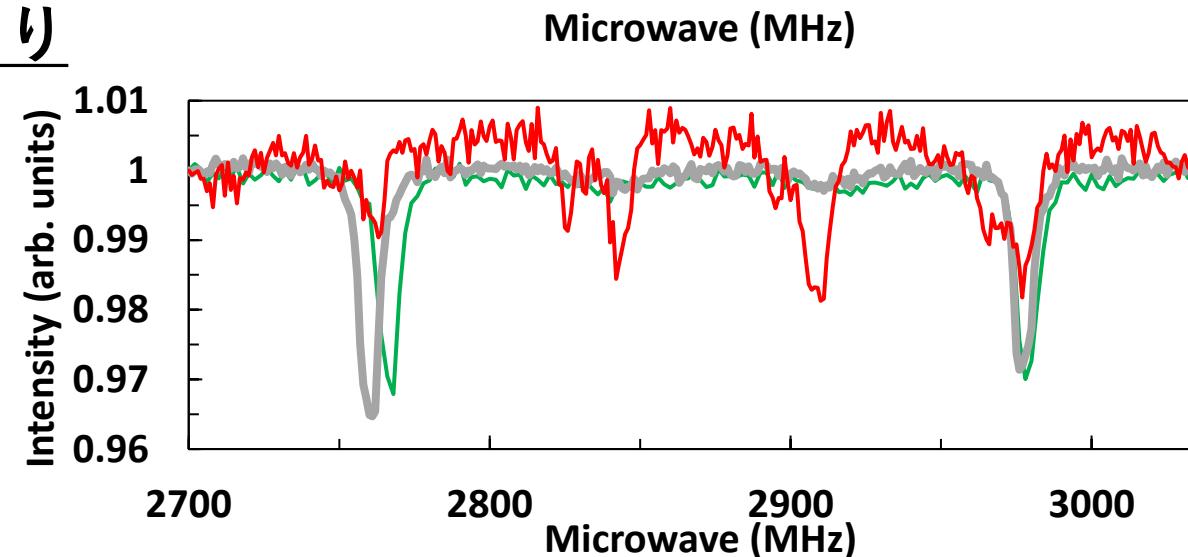
蛍光強度(/(w/o Ti))

	637 nm (NV-ZPL)	738 nm (SiV)
On Ti	40	100.9
5um Ti Gap	5.6	10.1
10um Ti Gap	1.3	1.9

NVセンターだけでなく、SiVセンターの蛍光も増大
→空孔欠陥導入がされたと推察

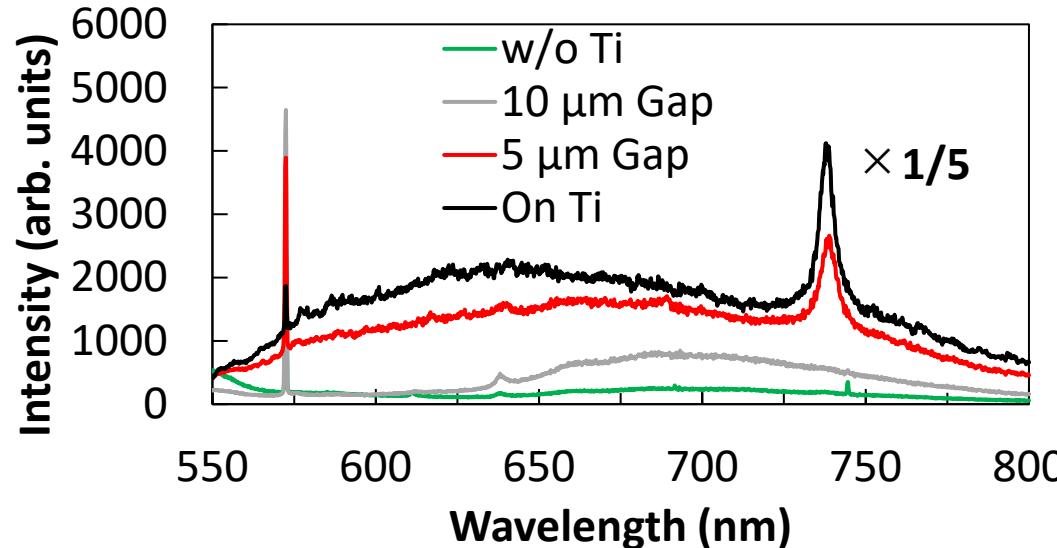
On Tiのスペクトルを見るとNVセンターが不安定な可能性がある。。。

ODMR測定

静磁場なし静磁場あり

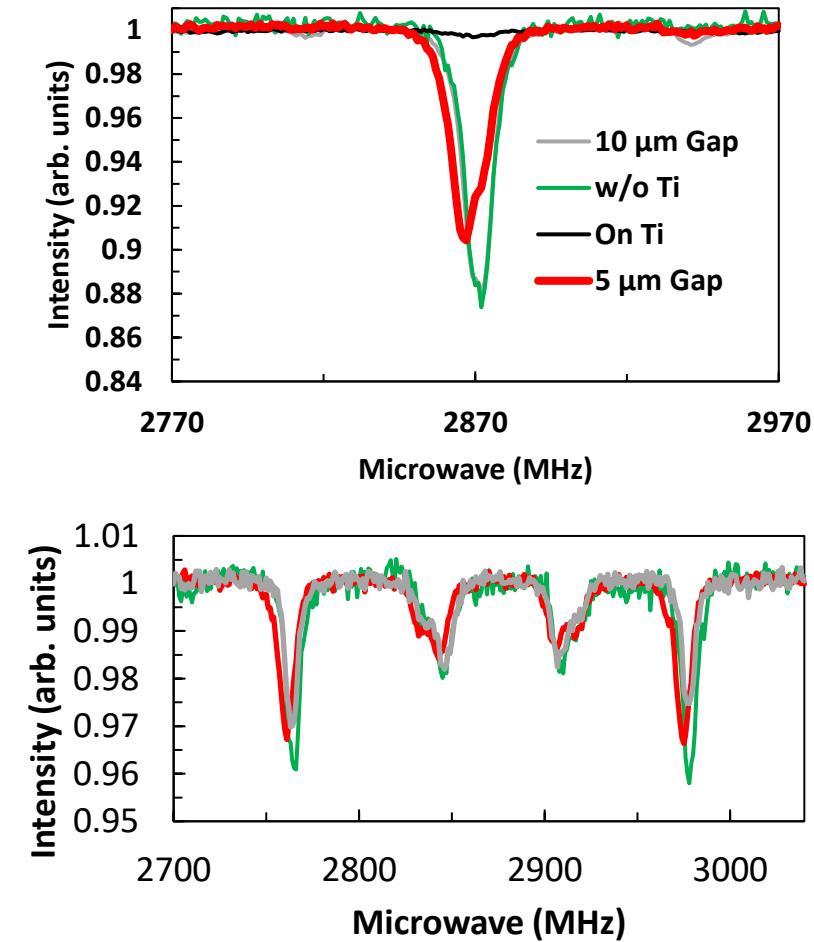
On TiではNVセンターが不安定, 5 μmGap上ではODMR線幅が広い
→歪み? or 空孔過多?

1200°Cアニール処理後

PL

蛍光強度(/(w/o Ti))

	637 nm (NV-ZPL)	738 nm (SiV)
On Ti	62.5	107
5um Ti Gap	9.0	13.4
10um Ti Gap	2.7	3

ODMR

5μmGapのODMRが他と遜色のない強度に改善

まとめ

本発表の新技術

Tiを用いたダイヤモンドへの空孔導入

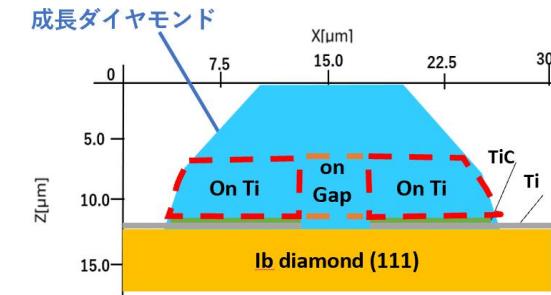


先行研究：金属上のみ空孔導入 & 量子センサ濃度増大(1のみ)

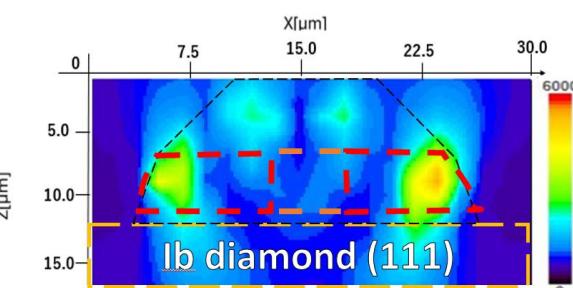
本技術:①だけでなく金属間(②)も蛍光増大

主な結果

模式図



蛍光マップ



Ti上(On Ti)、とTiパターン間(Gap)両方で
蛍光増大を確認

	637 nm (NV-ZPL)	738 nm (SiV)	ODMR 強度
On Ti	62.5	107	1/20
5um Ti Gap	9.0	13.4	0.8
10um Ti Gap	2.7	3	~1

Tiを使う事でTi上だけでなくTi間も量子センサ蛍光増大
高感度量子センサ製法として期待

想定される用途

本研究のメリット：Ti上だけでなくTi間のCVDダイヤモンドの蛍光が増大



NVセンタ濃度の高い、高感度ダイヤモンド薄膜合成の可能性

高濃度NV層



応用例

- ・高感度磁気イメージング
岩石, 車載用バッテリー, etc
- ・ダイヤモンド表面上の有機分子NMR

実用化に向けた課題

1. On Ti上でのNVセンター不安定(ODMRより)

原因

空孔過多と推察



解決法

- ・更なる高温アニール
- ・窒素添加

2. Ti上を完ぺきにOvergrowthする技術開発

現状

Ti間上方向の成長が優位



解決法

- ・CVD条件の精査
(横方向成長が優位になるように)

現在解決に向けて研究開発中

企業への期待

- ・未解決課題：本学CVDダイヤモンド技術により解決見込み

NV含有薄膜ダイヤモンドを用いた
量子センサ技術の導入を検討する
企業との共同研究を希望

知的財産権

- ・発明の名称 : 量子スピン欠陥含有ダイヤモンドの製造方法
- ・出願番号 : 特願2025-126258
- ・出願人 : 金沢大学
- ・発明者 : 林 寛、徳田 規夫、山崎 聰、猪熊 孝夫、
松本 翼、市川 公善、新実 秀汰

お問い合わせ先

金沢大学ティ・エル・オー

TEL 076-264-6115

e-mail info@kutlo.co.jp