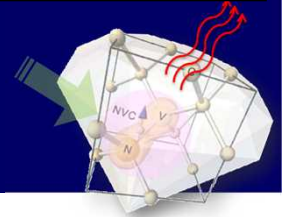


ダイヤモンド量子センサ システムの可能性



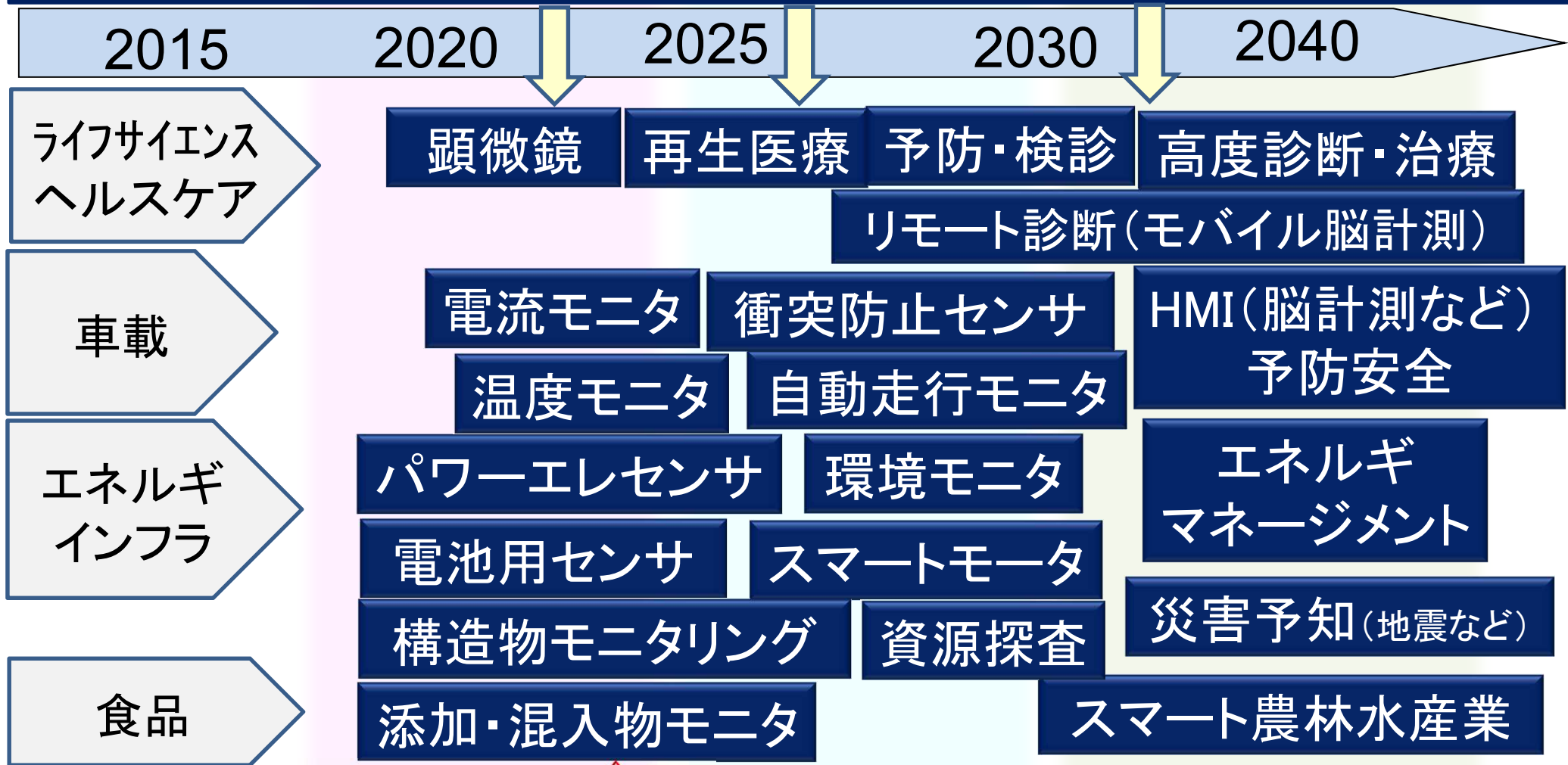
IoT, ライフ, 環境エネルギー分野の卓越した
学術領域と産業・社会の新たな価値創出を目指して

波多野 睦子

東京工業大学工学院電気電子系

1. 如何なる推進策を講じるべきか、のたたき台
2. ダイヤモンド量子センサの特徴
3. センサ材料・デバイス, 計測の高性能化、応用

ダイヤ/SiCセンサの応用ロードマップ(想定例)



応用領域拡大・早期開発

研究・人材投資
分野融合促進

技術展開

量子通信

量子計算機

ダイヤモンドNVセンタ 海外と日本の状況

US

- ▶ Harvard (3重要テーマ)・MIT・UCB など 18機関, EUとも連携。高度計測
- ▶ 基礎物理、物性、医学、地惑、融合
- ▶ 産業界: IBM, ベンチャ (QDTI) 軍事
- * 材料デバイス*

材料・デバイス技術は国際的に優位。応用を推進できる仕組み、人材と予算が必要。先端基礎研究も重要

ドイツ

- ▶ パイオニア→EU、欧米融合の中心拠点 Stuttgart, Ulm, Fraunhofer, IMEC, MaxPlanckなど、Quantum manifesto
- * 材料デバイス: IMEC, Fraunhofer 構築中
- Horizon2020 Quantum Tech. DiaDEMS Diamond Devices Enabled Metrology and Sensing
- ▶ 新規大型センタ Stuttgart, Ulmで建設中
 - ・センサに特化し基礎物理から産業応用
 - 4グループ分野融合
 - 低ノイズ、低振動建物 (3,000m² 40億円)
 - ・Center for Quantum Biosciences 物理と生物の融合研究 (建物20億円)
 - IQST (Integrated Quantum Science and Technology)
 - 産業界の参入: Bosch, Zeiss, Brukerなど
- * 国策である車、医用の高度計測

材料・デバイスリクエスト

オランダ

- QuTech
- Delft工科大+TNO
- EU Flagship(予定)
- Quantum Internet
- NV量子通信デモ1.3km
- * 材料(狙い: 日本人材) から 応用までの拠点構想

材料・デバイス・人材リクエスト

国際共同が戦略的に
行えるフレキシブルな
協創拠点が必要。
知財・標準化。
人材育成と国際化。

日本

東工大

CREST: スタート3年目

- ・世界唯一: 理論・材料・デバイス・計測・システム応用まで連携。
- ・産業界と共同研究: ニーズは高い!

量子機構, AIST, NIMS, NICT, NTT

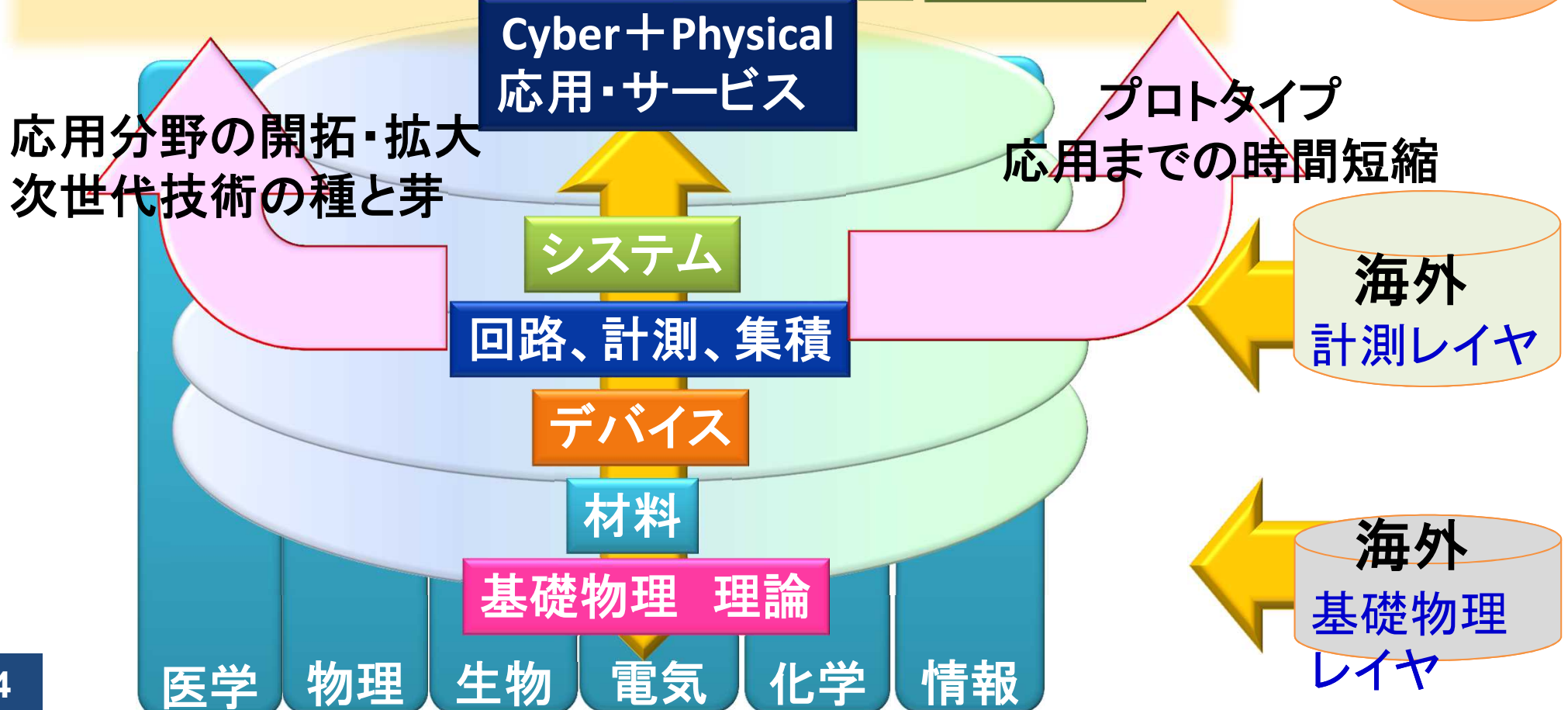
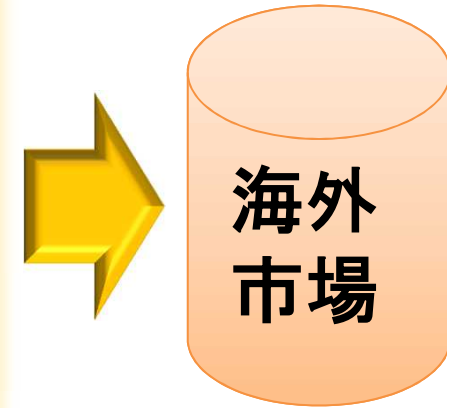
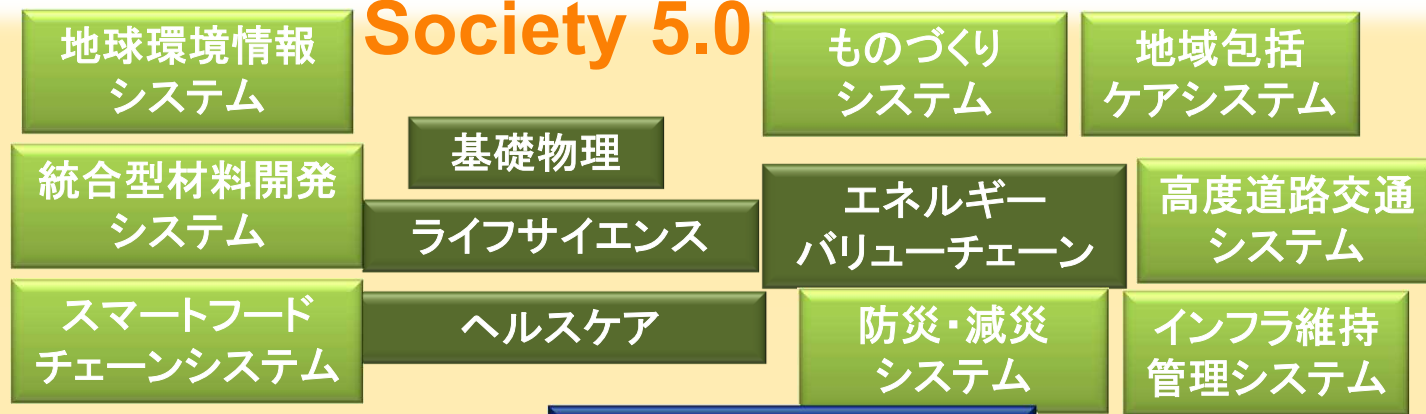
科研費

慶應、早稲田、京大、阪大、横国 など

産業界

ダイヤ/SiCセンサ協創拠点（イメージ）

Society 5.0

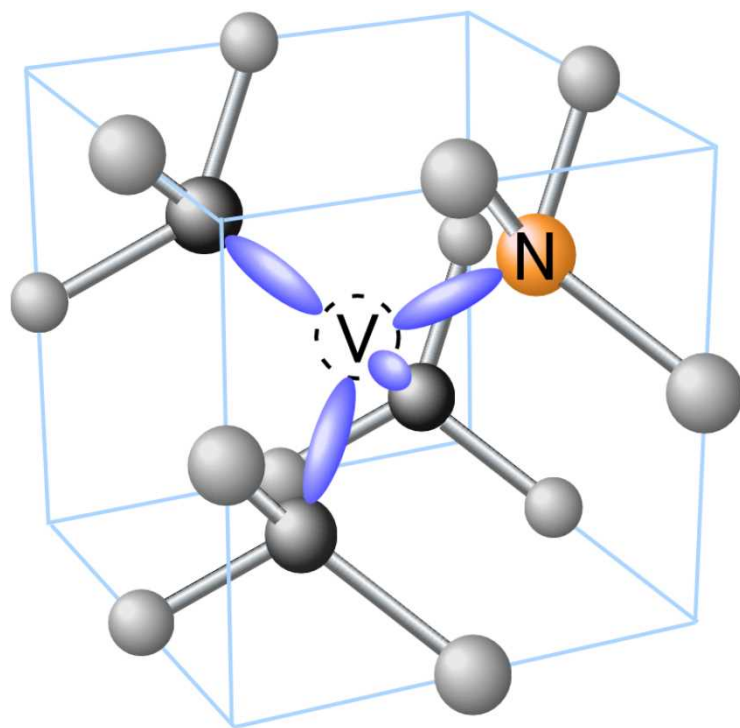


ダイヤモンド量子センサの 原理と特徴、応用の可能性

ダイヤモンド中の特異な窒素-空孔複合体(NVセンタ)

室温・大気中で十分に長いスピン緩和時間を有し、
固体で単一スピンを操作・検出可能

→ 磁場・電場・温度・歪などの高感度量子センシング

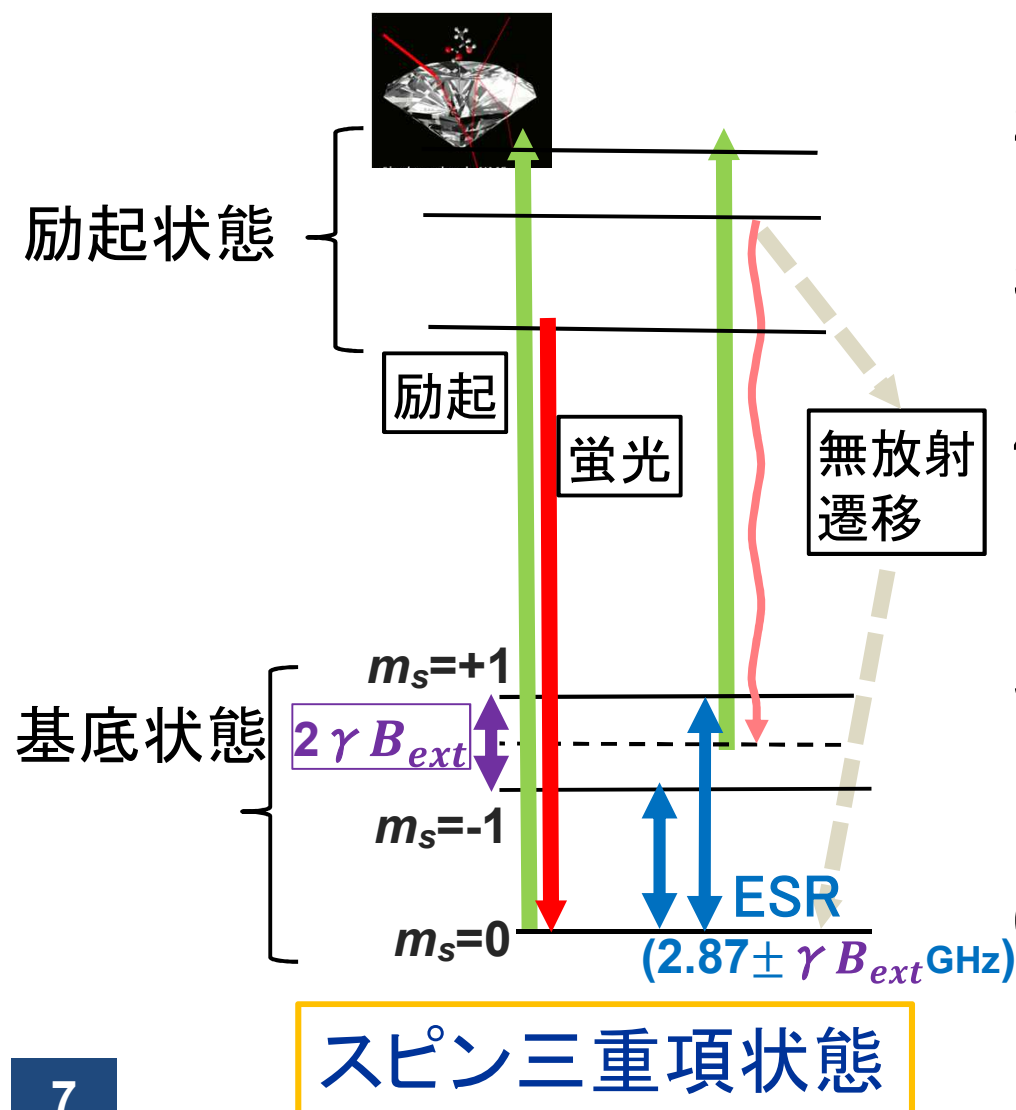


特徴:

1. ダイヤモンド中の負にチャージした「NV⁻」センタは、室温動作が可能な長いスピン緩和時間(T₂)を有し得る(~数ms)。
2. 基底状態で電子スピンをもつ(三重項状態)。
3. 電子スピン共鳴(ESR)の周波数が磁場強度に依存してシフト。

ダイヤモンド量子センサの原理 NV-センタによる磁場検出

ESRのイメージング(光検出磁気共鳴:ODMR); マイクロ波周波数掃引時の赤色蛍光強度低下点として磁場強度の検出が可能



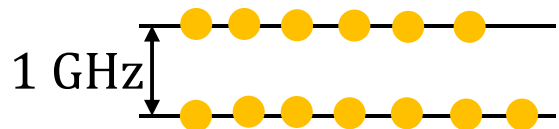
1. 緑色光を照射すると赤色の蛍光。
2. スピン($S=1$)状態の光による初期化・読み出し
3. ESRの高感度な光検出(光検出磁気共鳴:ODMR)
4. 蛍光過程は磁気共鳴(基底状態が $|1\rangle$ または $|-1\rangle$ にあるとき)しているときに起こり難くなる。
5. $|1\rangle$ と $|-1\rangle$ が磁場強度に比例して分離されるため、蛍光強度は磁場に応じて変化。
6. マイクロ波(2.88GHz前後)の周波数掃引時の赤色蛍光強度の低下点として磁場強度の検出が可能。

ダイヤモンド量子センシングの特徴

光によるスピン偏極が可能

電子スピン共鳴 (ESR) のエネルギースケール: $1 \text{ GHz} \sim 4.1 \times 10^{-6} \text{ eV}$

占有数の比 (室温)

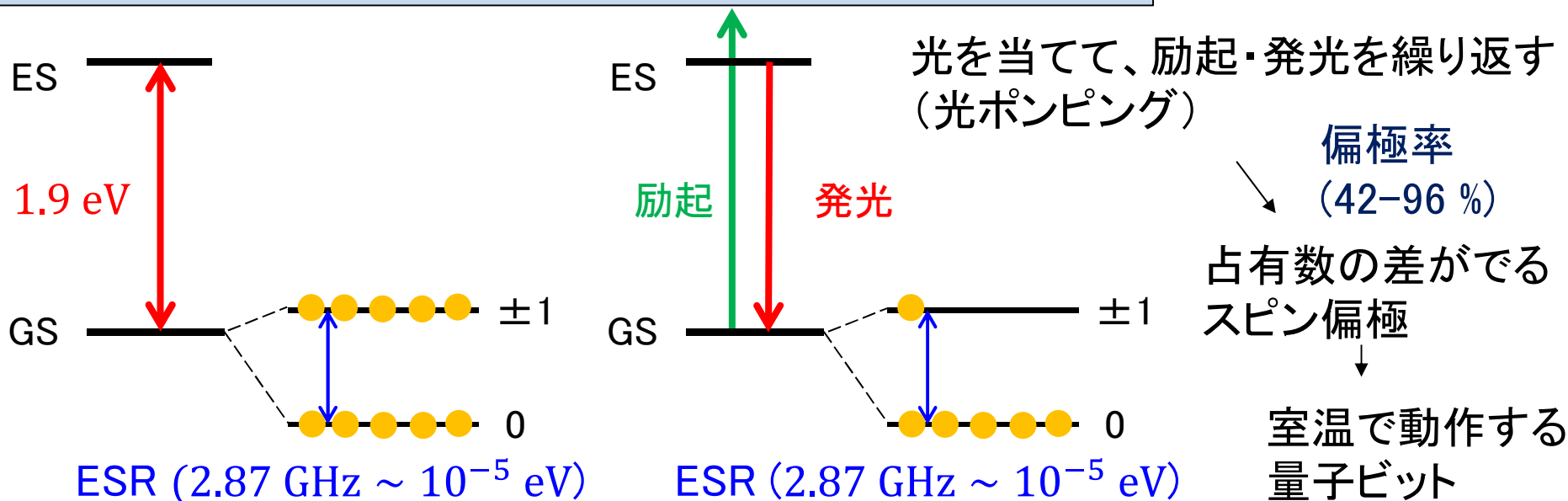


$$\frac{f(1)}{f(0)} \sim \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \sim \exp\left(-\frac{4.1 \times 10^{-6} \text{ eV}}{26 \times 10^{-3} \text{ eV}}\right) = 0.99984$$

0.02 % ぐらいしか差が無い → 信号が小さい

- [解決策]
- ・電子スピンの集合の信号をみる (従来の ESR)
 - ・温度 (T) を小さくする (ふつうのスピン量子ビット)

ダイヤモンド NV⁰C の特徴: 光によるスピン偏極が可能

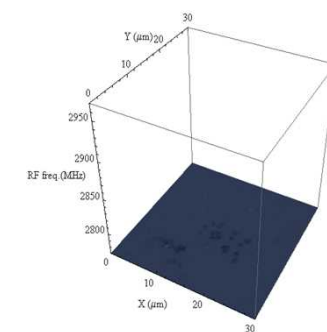


- 高い空間分解能と感度を併せ持つ
- 常温でベクトルイメージングが可能

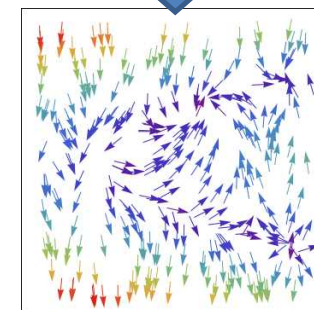
* ESRのイメージングができる
 固体材料(ダイヤとSiC)

CMOSイメージセンサの磁性バージョン(光検出磁気共鳴: ODMR)

性能 / 機能	SQUID	ホール素子	ダイヤモンドセンサ (NVセンタ)
感度	◎	△	○高いダイナミックレンジ リニアリティ
常温 大気中動作	× 極低温 (生きた細胞×)	○	○
空間分解能	× >5 μm	○ >100nm	◎スケラブル 数nm - 数mm
磁場ベクトル イメージング	×	×	◎ 細胞・ニューロンの動き 高機能非破壊検査



2次元スペクトル



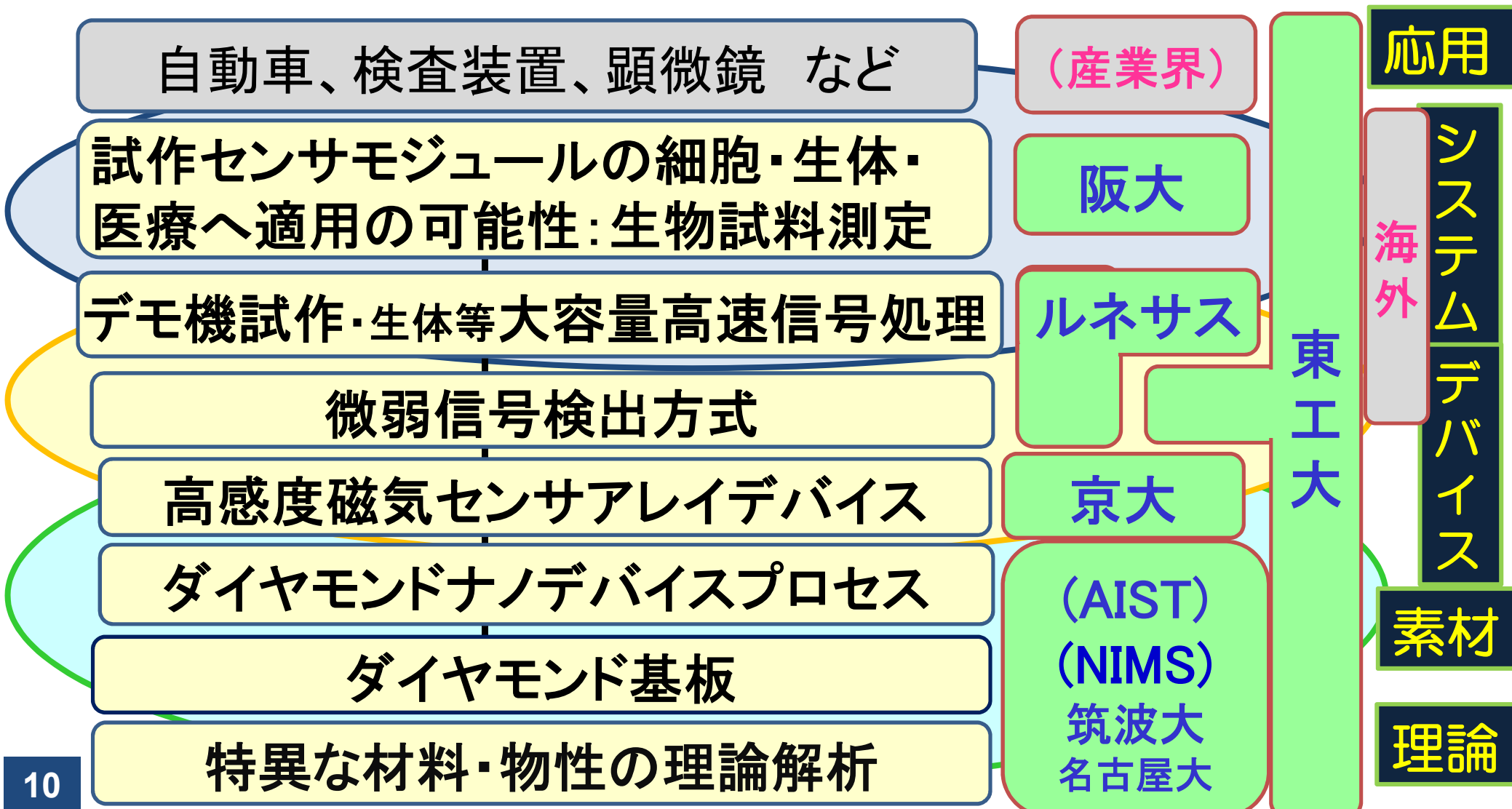
磁場ベクトル
イメージング

- 2次元計測ファクションの応用からのニーズ

- ・MRI, 脳磁計測: 2次元空間分解能向上による深さ方向推定精度向上
- ・細胞計測: 生きた細胞観測のため時間制限(<ms)

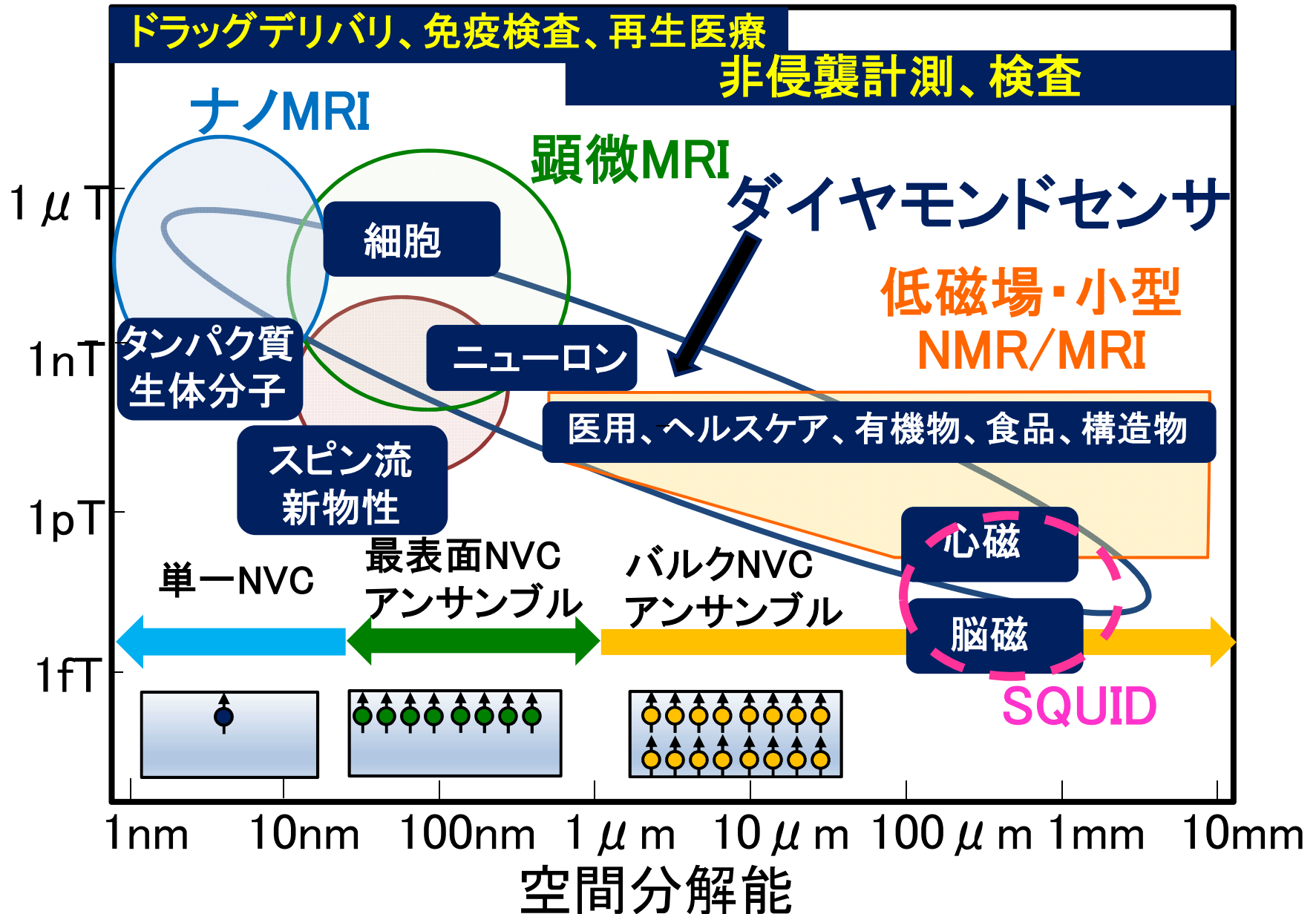
CREST 研究総括： 桜井 貴康（東京大学 生産技術研究所 教授）

領域名：素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成
常温動作、高い感度・空間分解能を有するダイヤモンドセンサモジュールの開発。



ダイヤモンドセンサの性能と応用

磁気感度 $[1/(\text{Hz})^{1/2}]$



高感度磁気センサ応用の分類とコア技術

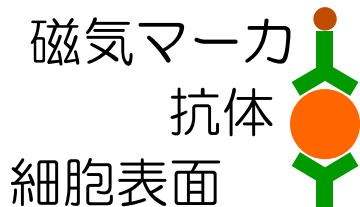
ナノ～ミクロスケール

高配向・高密度
デルタドープCVD

微弱自発磁化

高感度DC/パルスODMR計測：
1/f・電力線雑音対策、差動計測、
磁気シールド

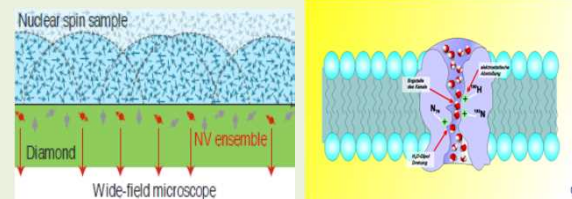
免疫・細胞計測



磁界による励起 NMR/MRI

高感度AC計測：
ダイナミカルデカップリング

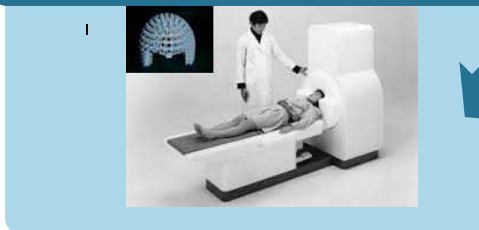
細胞・蛋白質計測



マイクロスケール

高配向・高密度厚膜CVD
基板+電子線照射

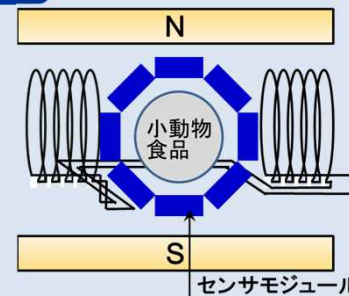
脳磁界・心磁界
車載用磁気センサ



高感度
磁気
センサ

小型 NMR/MRI

医用・ヘルスケア 小動物、食品



高感度センサデバイス

ダイヤモンドセンサの高感度化

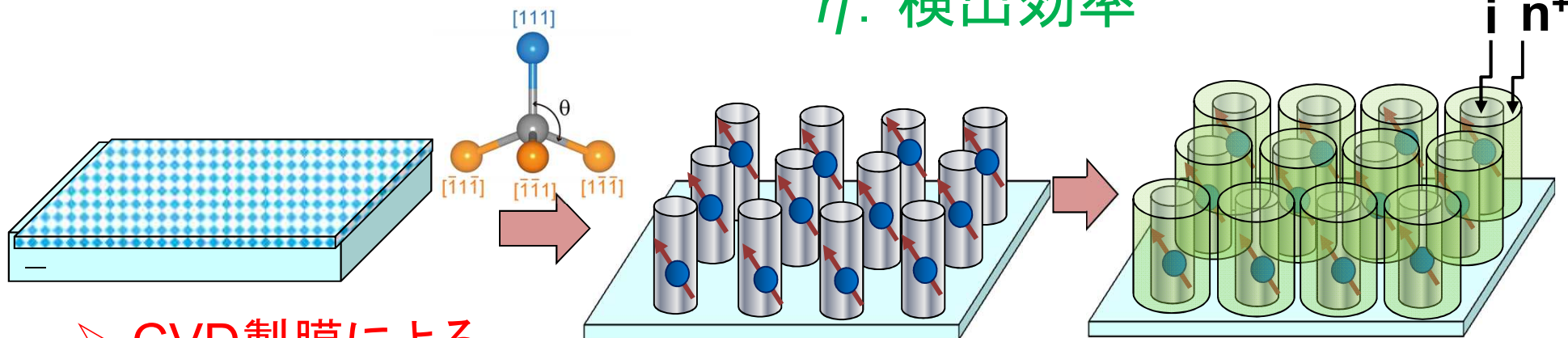
$$\delta B \approx \frac{1}{g_s \mu_B R A \sqrt{\eta}} \frac{1}{\sqrt{N T_2}}$$

N : NV⁻ 密度

A : NV軸配向アライメント

T_2 : スピンコヒーレンス時間

η : 検出効率



➤ CVD製膜による
高品質アンサンブル
NV センタ N & $T_2 \uparrow$

➤ NV軸方向制御 $A \uparrow$

➤ AC計測
Phase-decoupling 技術 $T_2 \uparrow$

➤ 集光効率向上
ボトムアッププロセス
(選択成長)による
マイクロ構造形成

$\eta \uparrow$

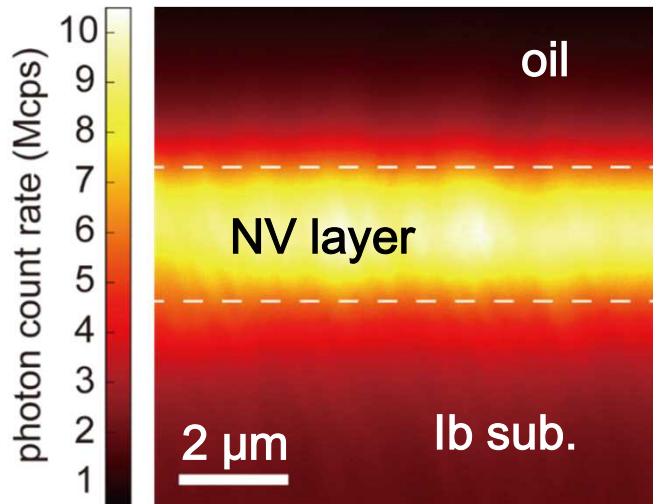
➤ 電子スピンをもつ
NV-センタの誘起と
安定化

pn接合技術の活用

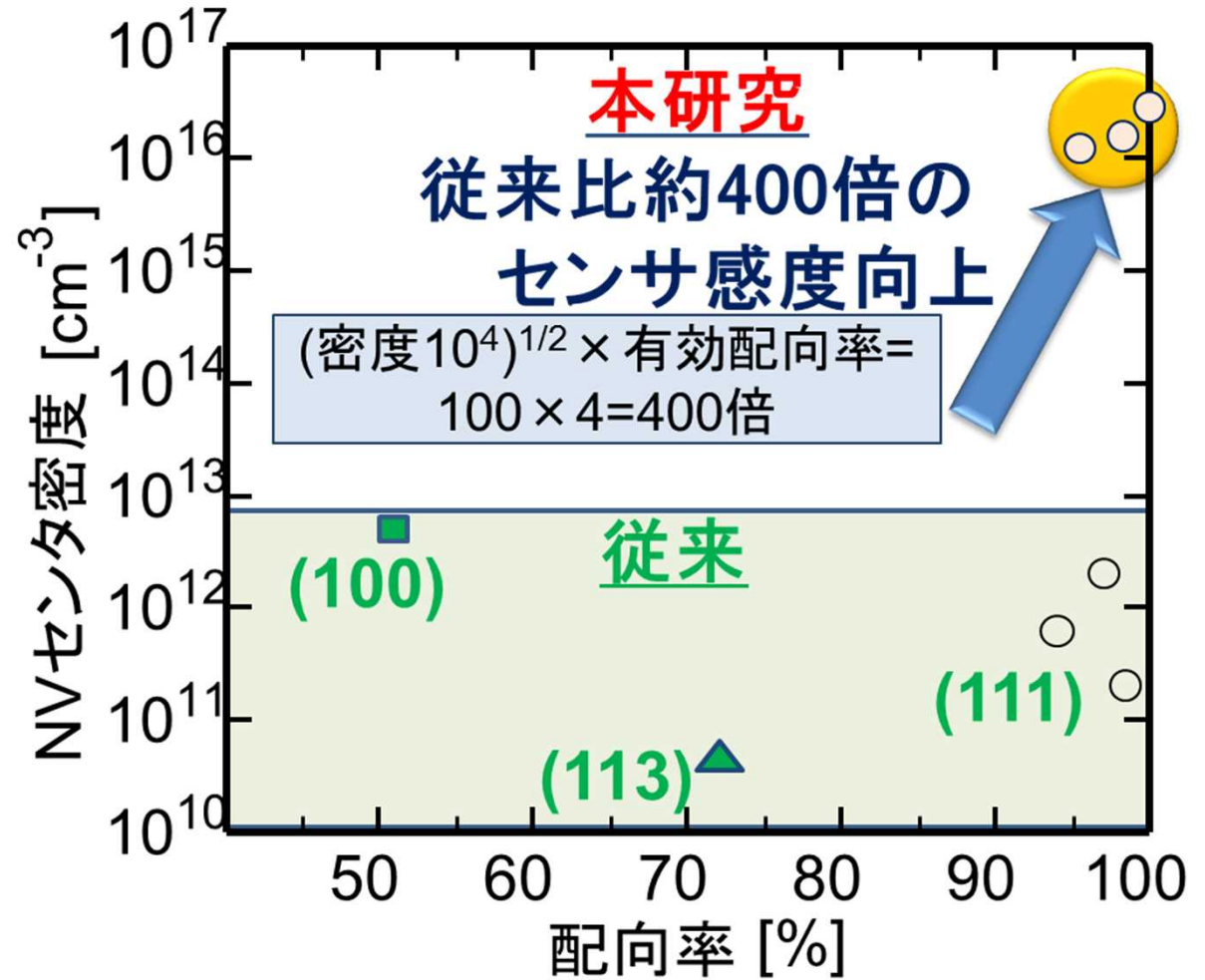
$N \uparrow$



マイクロ波プラズマCVDによるダイレクト形成



高密度NVs

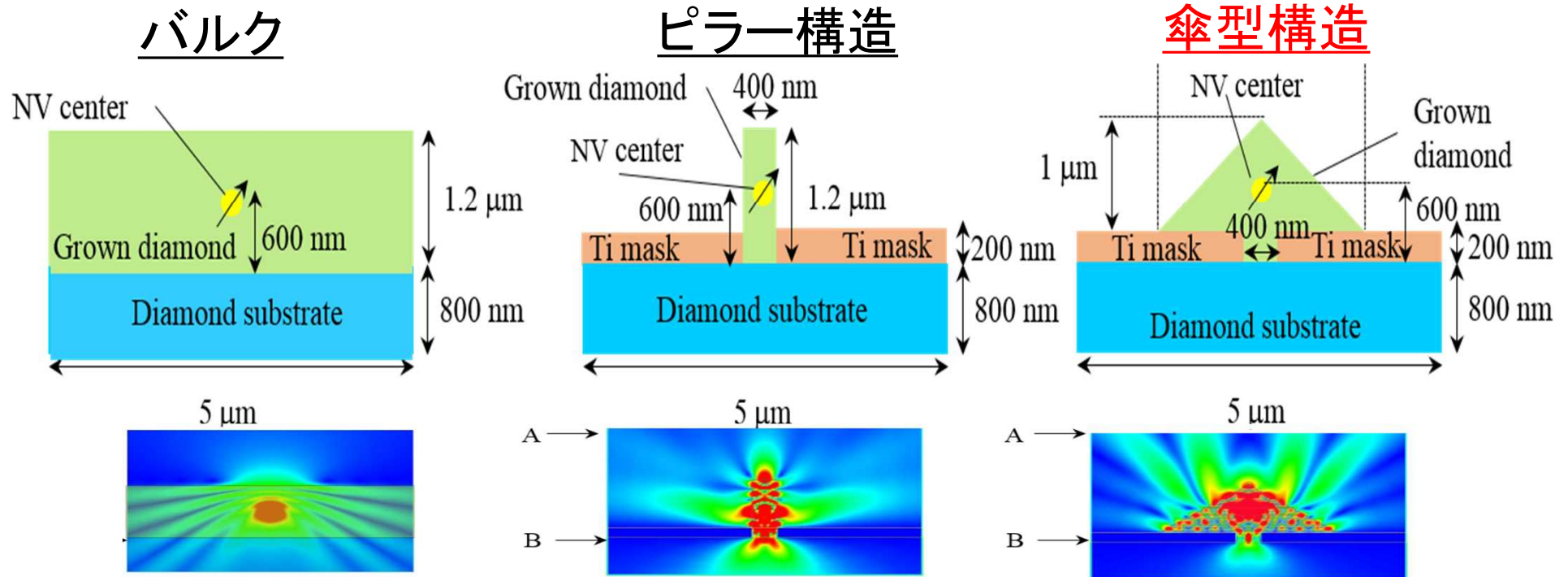


K. Tahara, H. Ozawa, T. Iwasaki, M. Hatano et al.:
APL 107, 193110 (2015).

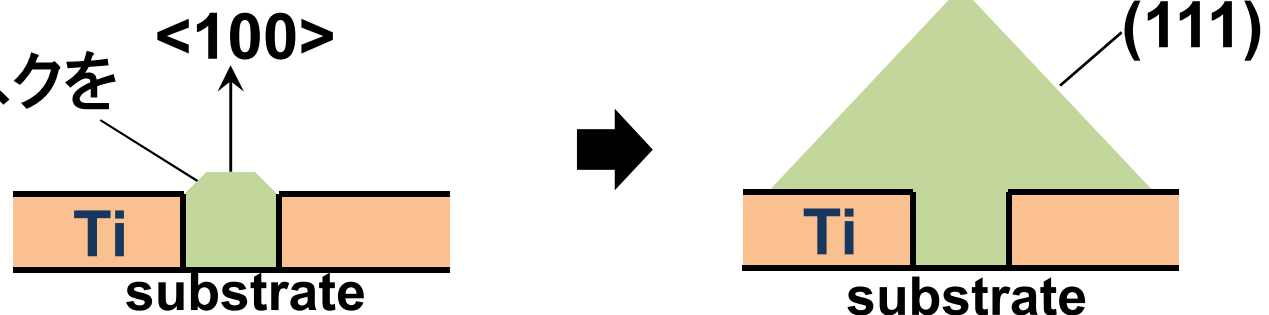
デバイス・膜技術 ボトムアッププロセスによるマイクロ構造形成

高屈折率(2.4)のダイヤモンドの光取出し率向上のため、CVDで選択成長した傘型マイクロ構造体を形成。バルク比約5倍向上(計算では9倍)。

S. Furuyama*, K. Tahara*, T. Iwasaki, M. Hatano et al. APL 107, 163102 (2015).



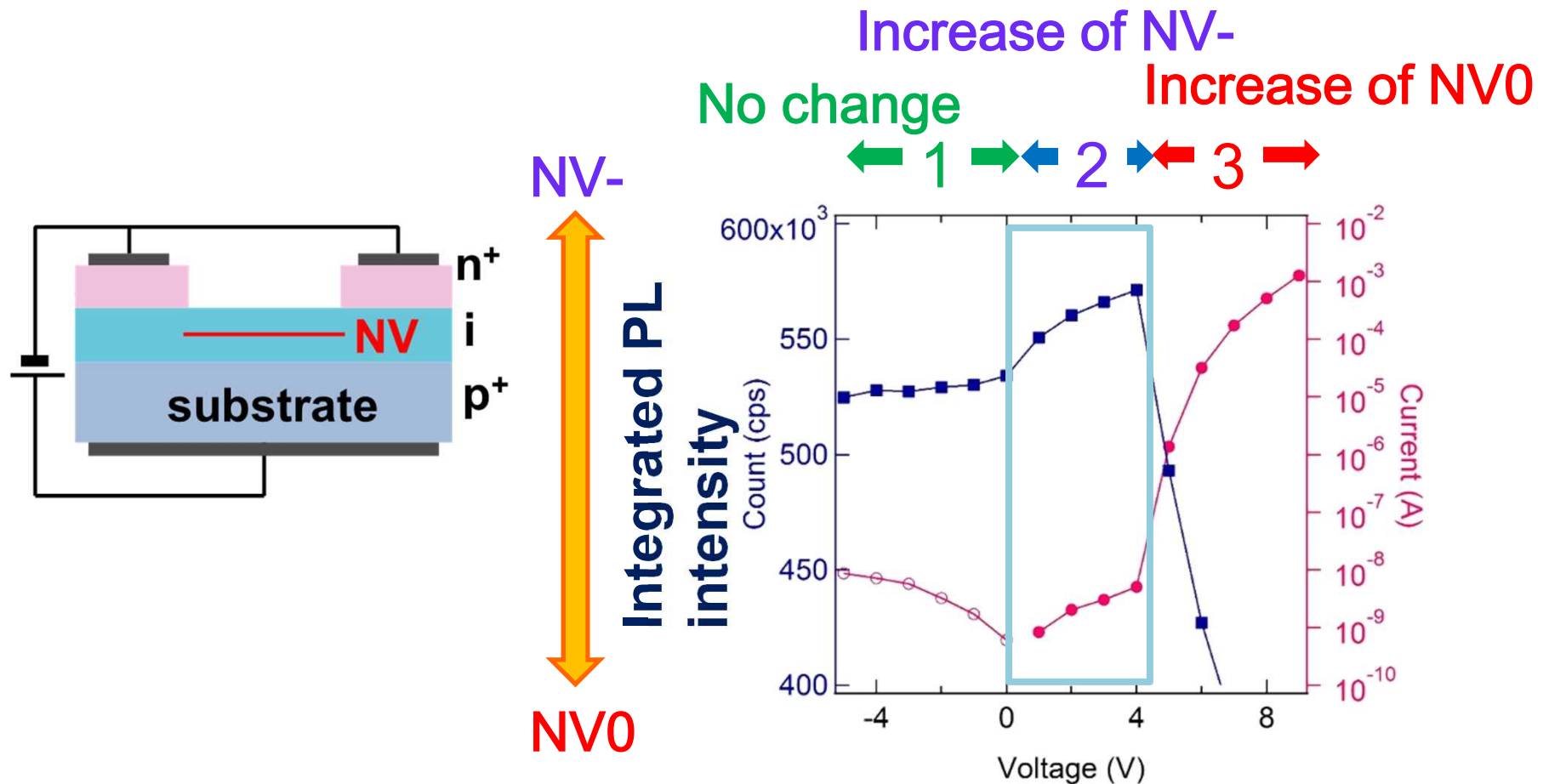
ミラーとなるTi マスクを介して選択成長



デバイス技術 電子スピンを有するNV⁻の安定制御

- pn接合に印加する電圧でNVセンタの電荷を制御
- 長いスピンコヒーレンス時間を保持しつつ、NV⁻を安定化

M. Shimizu, M. Hatano et al. Diamond Relat. Mater, Vol63, p192 (2016).



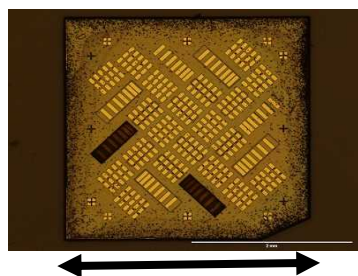
センサの大面積化

Si基板上ダイヤモンド膜の合成

3C-SiCバッファ層を介してSi基板上へのダイヤモンド膜合成。

J. Yaita, T. Iwasaki, M. Hatano, et al., JJAP, 54 04DH13 (2015)

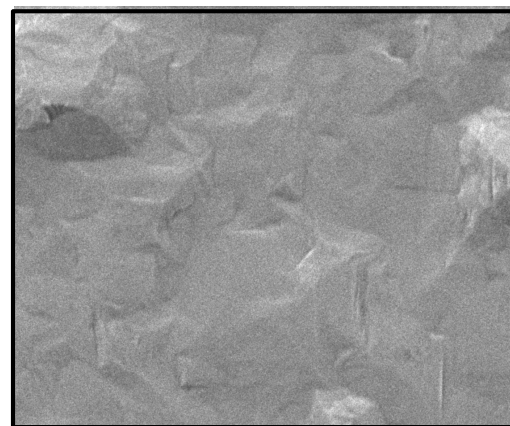
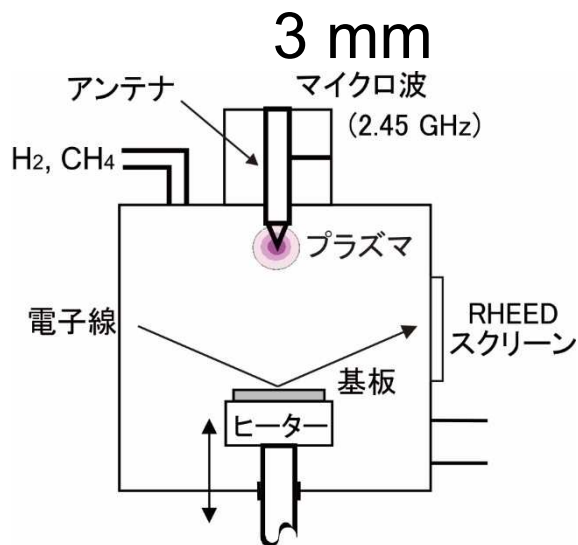
高温高压合成基板 ~5 mm



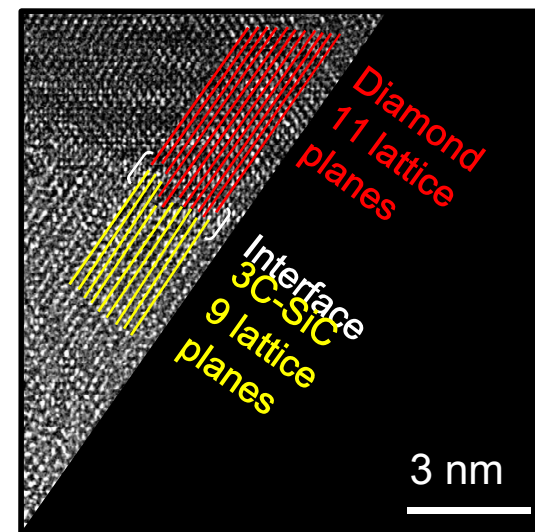
ヘテロエピタキシャル成長
Si基板上において6インチ可能



3C-SiCバッファ層



連続膜合成

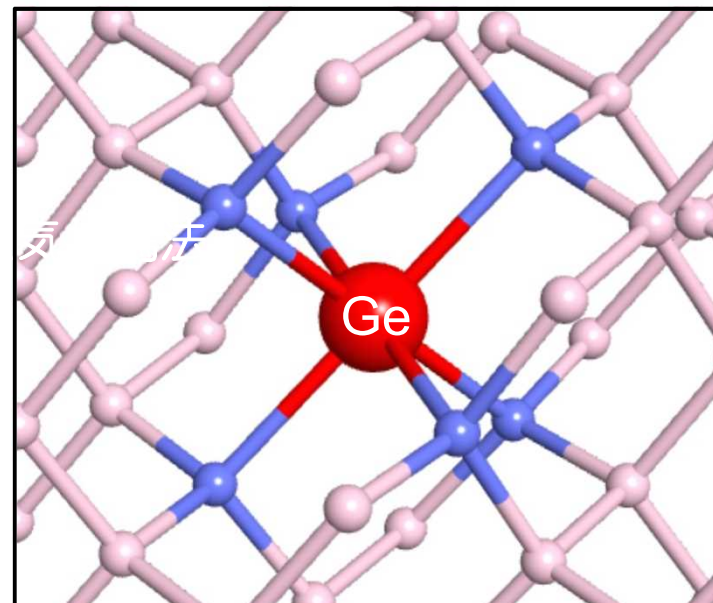
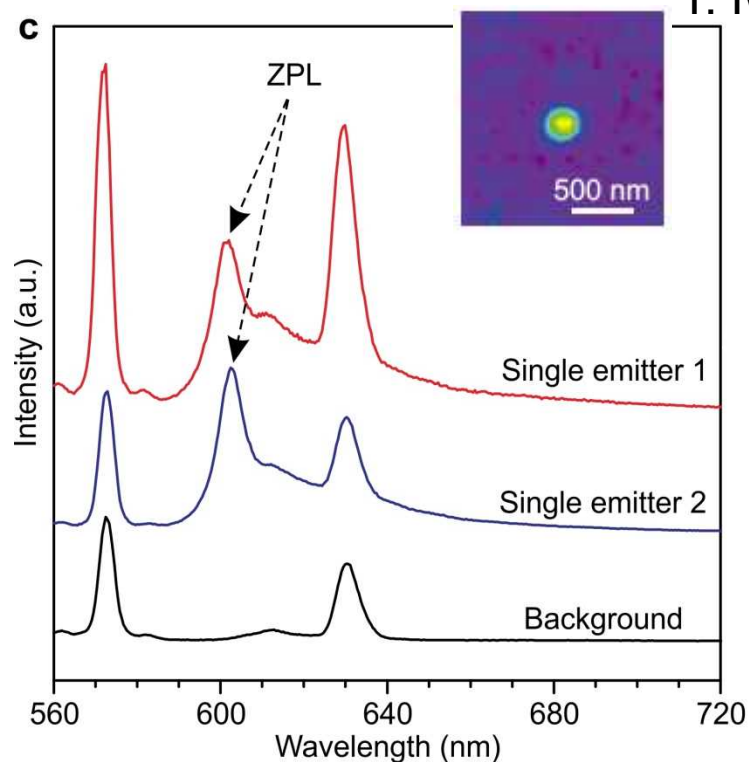


独自の高密度プラズマCVD

新規カラーセンタ

ゲルマニウム-空孔(GeV)センタを発見。バイオマーカ、量子通信に有望。

T. Iwasaki, M. Hatano, et al., Scientific Reports 5, 12882 (2015).



- シャープな ZPL ~602 nm
- 単一の発光の確認
- イオン打ち込み法、CVD法、ともに形成可能
- 他のカラーセンタよりも制御性高い