

NIMS量子マテリアル研究拠点

2023年2月1日

物質・材料研究機構 谷口 尚

1. NIMSにおける量子マテリアル基礎基盤研究PJの紹介

研究例

- 磁気感度に優れたダイヤモンドNV-センタの創製
- 高品位量子ドットを用いた次世代量子光源の開発
- 二次元物質積層・モアレ超格子構造とナノ構造による量子機能開拓
- 先進トポロジカルレーザーの開発

2. マテリアルDXプラットフォームとの連携

NIMS量子マテリアル基礎基盤研究PJ

量子技術イノベーションに向けた物質・材料の基礎基盤研究

理論

大規模第一原理計算(CONQUEST),
NIMS発トポロジ系理論

トポロジカル共振器面発光レーザー

材料創製

量子ドット
ダイヤモンド
原子層材料(hBN)
磁性体薄膜,
超伝導材料 (Bi2212)
MBE,CVD,HPHT
先端原子層積層技術
ナノ微細加工技術

量子暗号通信

量子センシング(NV-センター)

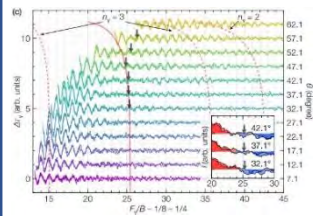
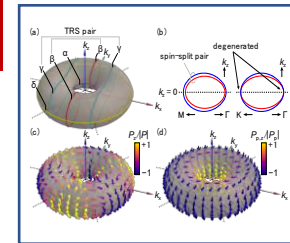
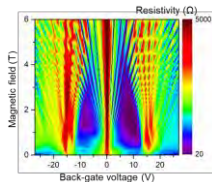
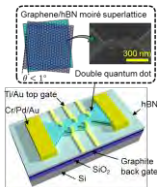
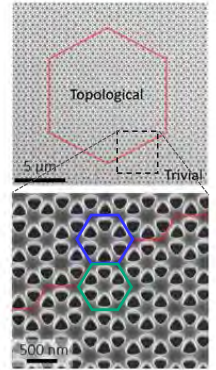
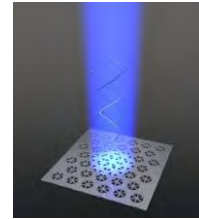
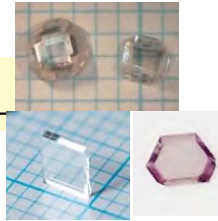
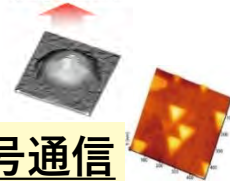
2次元系原子層量子ビット
スキルミオン探索

トポロジカル物質及びボルテックス制御

先端計測・解析技術

低温強磁場、量子振動
強磁場中極低温STM
角度分解光電子分光
光物性評価,単一光子分光(共焦点顕微PL分光)

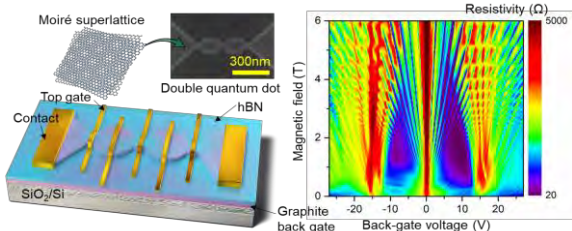
Single photons
Entangled photons



NIMS量子マテリアル基礎基盤研究PJの例

2次元原子層の量子機能制御

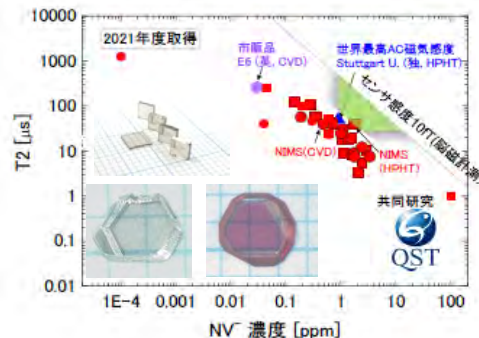
モアレ超格子単一電子操作デバイスの実現・新奇現象の発見



T. Iwasaki, et al., Nano Lett. **20**, 2551 (2020).

情報

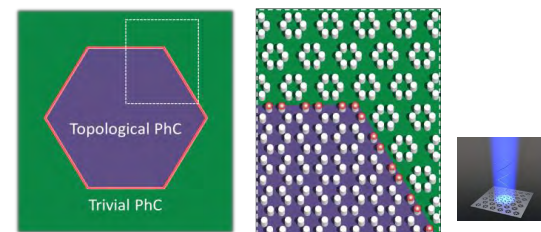
ダイヤモンドNV-センタの高度化



C. Shinei et al., Appl. Phys. Lett. **119**, 254001 1-5 (2021).

計測

NIMS発トポロジ系理論を背景とした量子機能発現



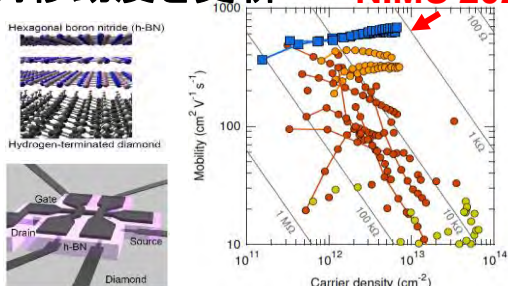
トポロジカル共振器面発光レーザー (TCSEL)

Z.K. Shao, X.-X. Wang, X. Hu et al., Nat. Nanotech., **15**, 67 (2020).

光源

ダイヤモンドFETで世界最高移動度を更新

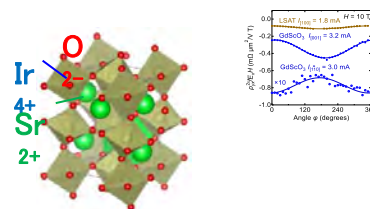
NIMS 2022



水素終端表面のhBN保護膜による安定化
Y. Sasama et al. Nat. Electro. **5**, 37 (2022).

情報

トポロジカル量子ビット実現を目指した材料基盤構築



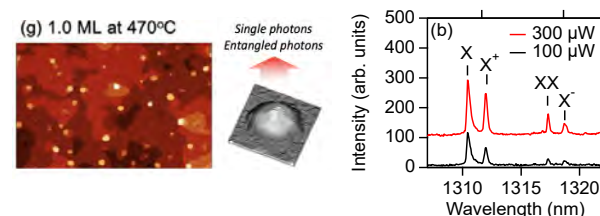
酸化物トポロジカル半金属の非線形スピン伝導の観測

Y. Kozuka et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 236801 (2021).

情報

量子ドットもつれ光源の開発

格子不整合系量子ドットの形成



通信波帯量子ドットの作製技術を確立

T. Mano et al., Cryst. Growth Des **21**, 3947 (2021).

通信

磁気感度に優れたダイヤモンドNV-センタの創製

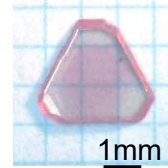


NV-センタの強み

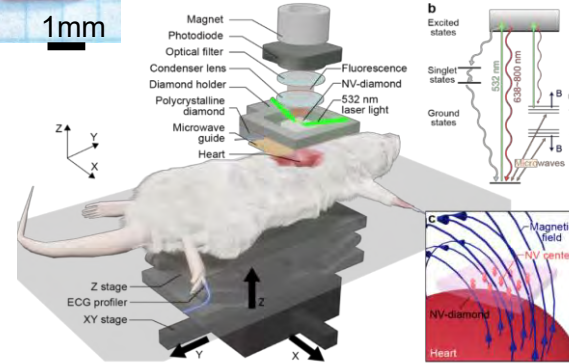
- 高環境耐性(高温下、生体内)
- スピン状態の簡便読み取り
- 磁場ベクトル計測

NIMSの強み

- 2種類(高圧・CVD)の成長法
- 成長と評価が1機関で可能



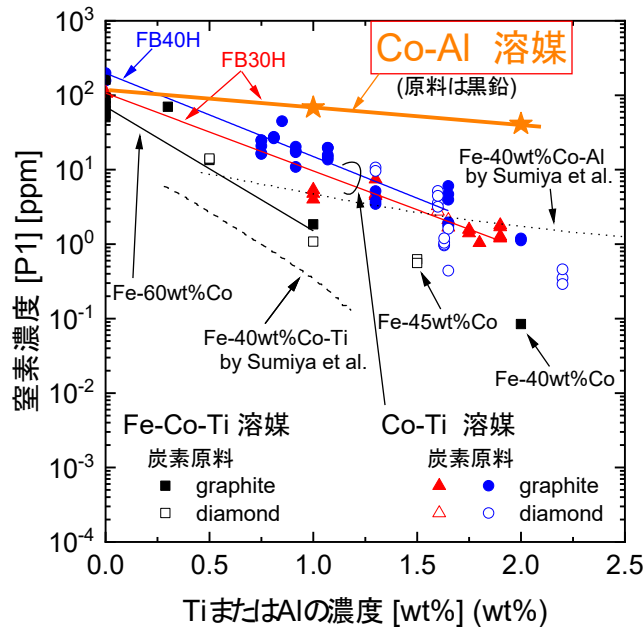
ラットの心磁計測



Q-LEAP東工大,QST,NIMS

不整脈診断

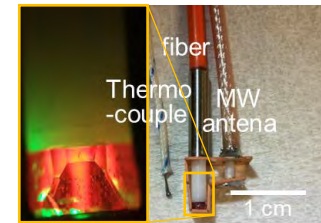
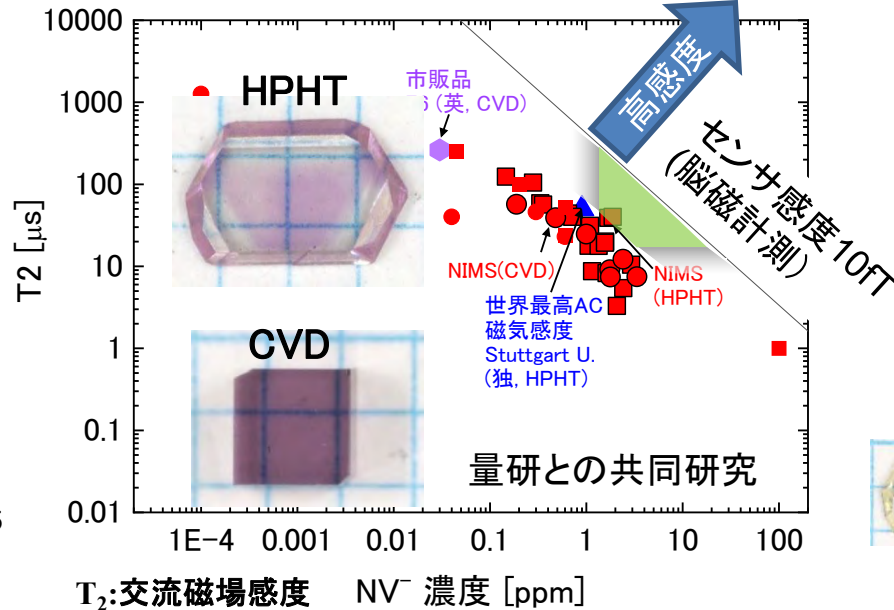
$$\text{磁気感度 } \delta B \approx \frac{1}{\sqrt{[NV^-]} \sqrt{T_2^*}}$$



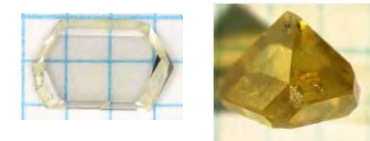
高圧合成による窒素濃度制御

電気自動車 (EV) の電流モニタ

- 約10 mA精度@ $-150^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$



Q-LEAP
東工大, 矢崎総業,
QST, NIMS



照射(irradiation)によるNV中心の形成

step1

Diamond containing N impurities



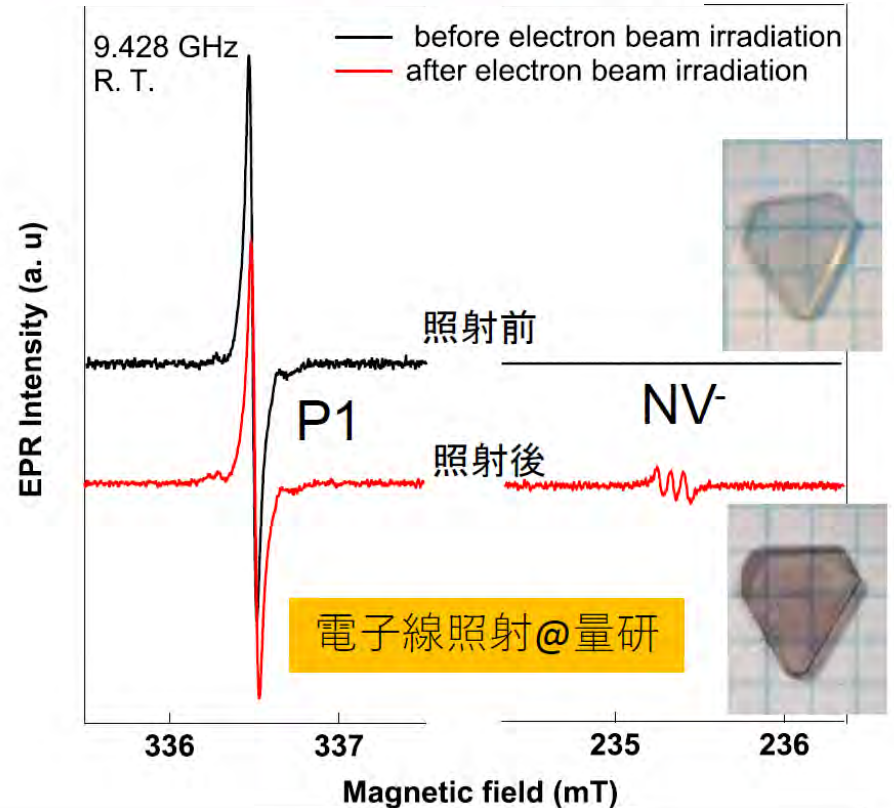
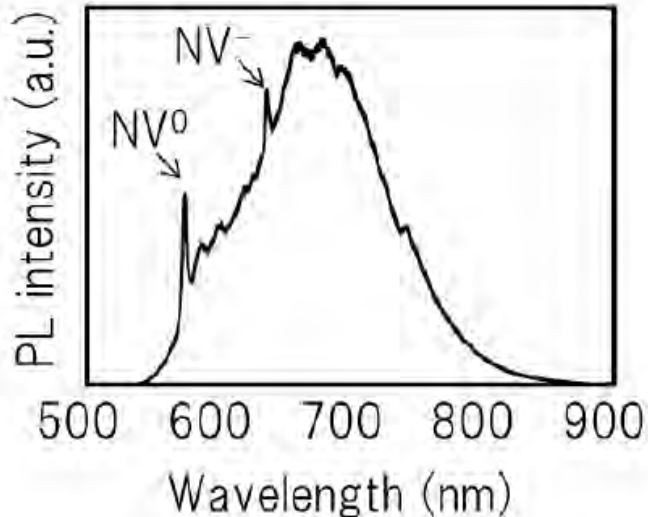
step2

Uniform electron beam irradiation



step3

Thermal treatment
(vacancies diffuse and
combine with nitrogen)



NIMSの高圧合成研究

1984年(当時無機材質研究所)に世界最大級の3万トンプレスを導入

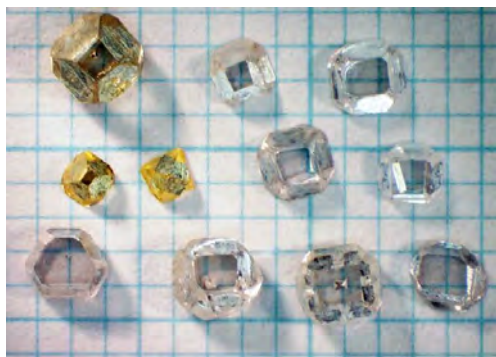


3万トンプレス



超高圧プレス群

ダイヤモンドと立方晶窒化ホウ素単結晶合成



ダイヤモンド単結晶

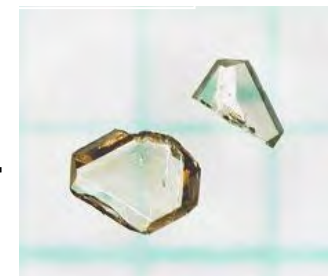


立方晶窒化ホウ素単結晶



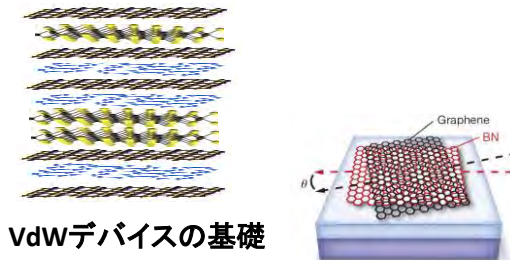
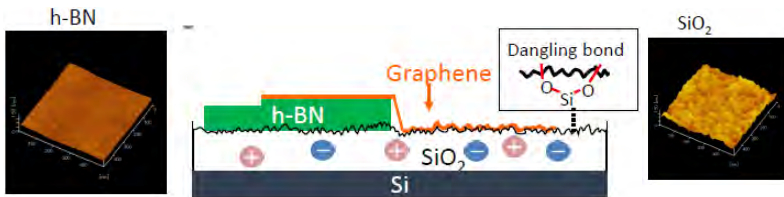
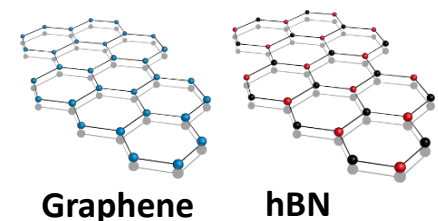
高純度化を目指す

cBN



二次元物質の量子物性探索

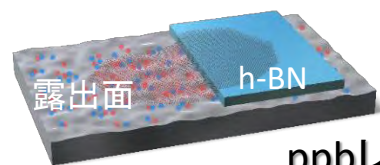
・六方晶窒化ホウ素(hBN) 原子層で唯一の絶縁体(ワイドギャップ半導体) 原子レベルで平滑、表面にダングリングボンドを持たない



hBNとの積層構造によりグラフェンの品質向上

C.R.Dean, A.F.Young, T.Taniguchi, K.Watanabe, J.Hone, P.Kim et al., Nature Nanotech. (2010).

Y.Cao, T.T., et al., Nature (2018).

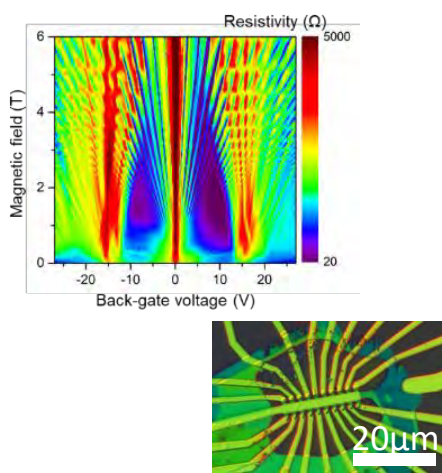
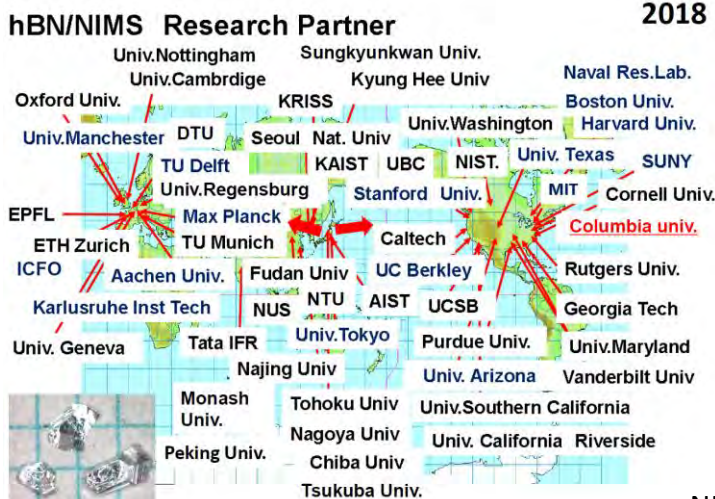


ppbレベルの不純物制御

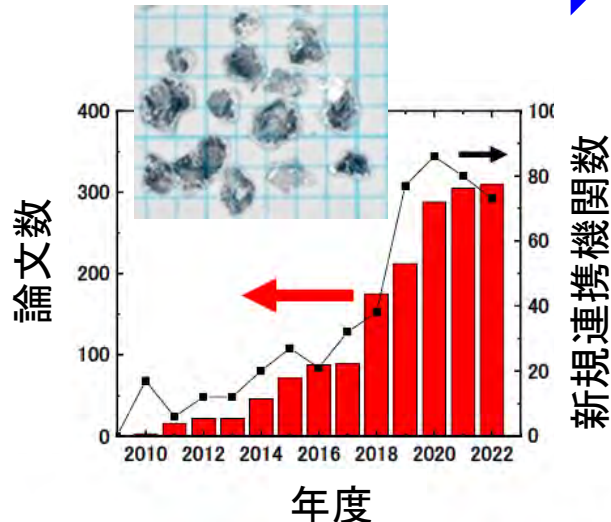
転写技術の発展

モアレ超格子の発見

ツイスト構造による強相関・超伝導現象“Twistronics”



NIMS, T.Iwasaki et.a (2022).

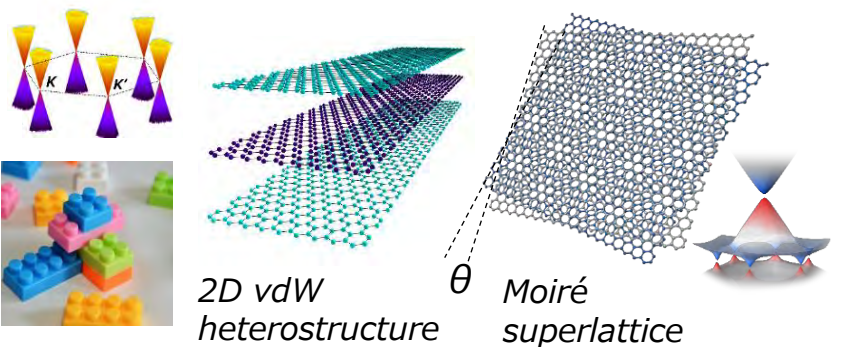


hBN結晶の新規送付先、共著論文数の推移(累計1000報以上)

25か国,300研究グループ以上と連携

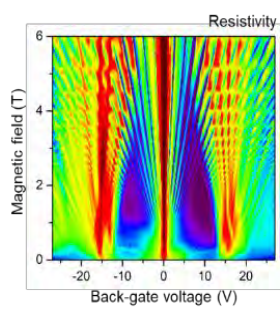
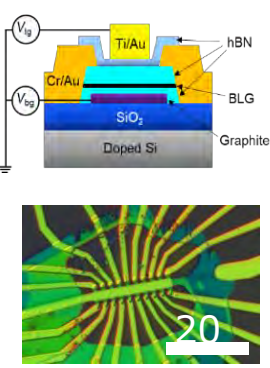
国内: 東大、京大、理研、QST、AIST、NTT他

二次元物質積層・モアレ超格子構造とナノ構造による量子機能開拓

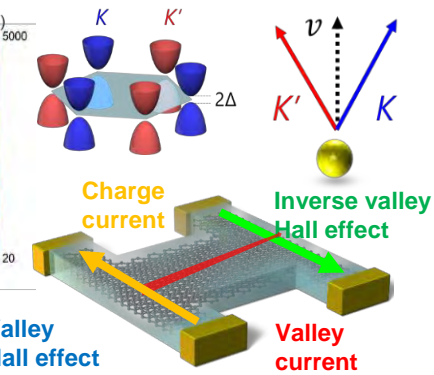


二次元物質: グラフェン、hBN、MoS₂、WSe等

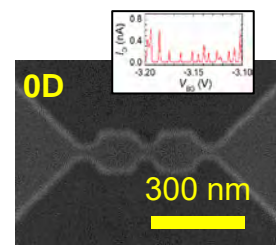
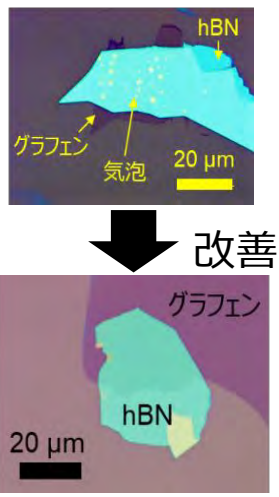
積層構造特有の自由度: 積層角度、材料組み合わせ等



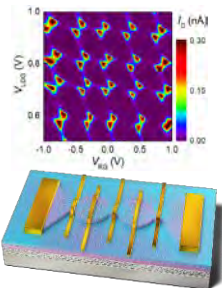
Twistronics & Valleytronics



高品質モアレ超格子デバイスによる新奇物性



Quantum dot, qubit



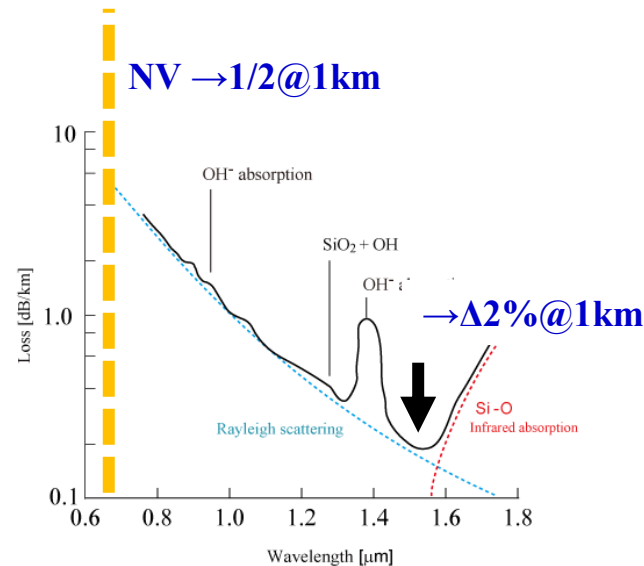
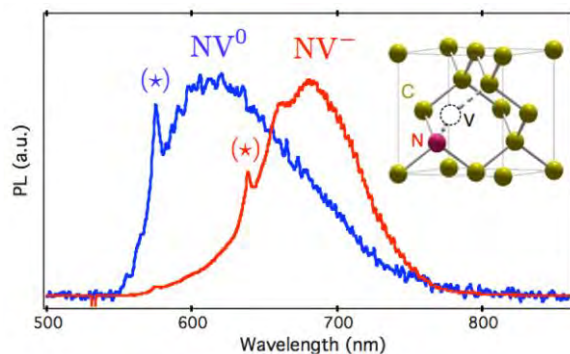
Quantum point contact

ナノ構造による量子輸送現象

- 二次元物質を機械的剥離・転写により積層させ、ナノ構造デバイスを設計・作製し、低温での電子輸送特性の解明
- 二次元特有のバレー自由度や電界制御を活用し、将来の低消費電力デバイスや量子情報処理技術への応用展開を目指す。

独自開発の二次元物質転写法により世界最高水準品質の二次元デバイスを実現可能

ポストダイヤモンドNV-センター： 高輝度、発光波長(637nm)制御への挑戦



新規カラーセンターの探索・活用

IV族系

SiV, SnV, PbV @ ダイヤモンド

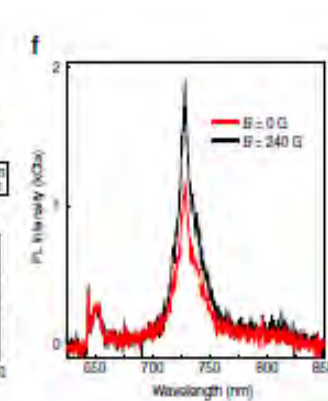
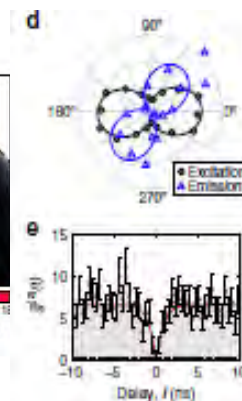
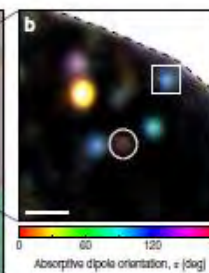
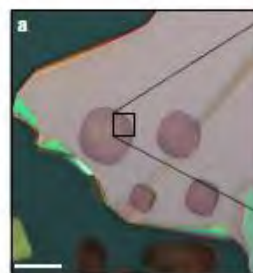
SiC

2次元系原子層

hBN

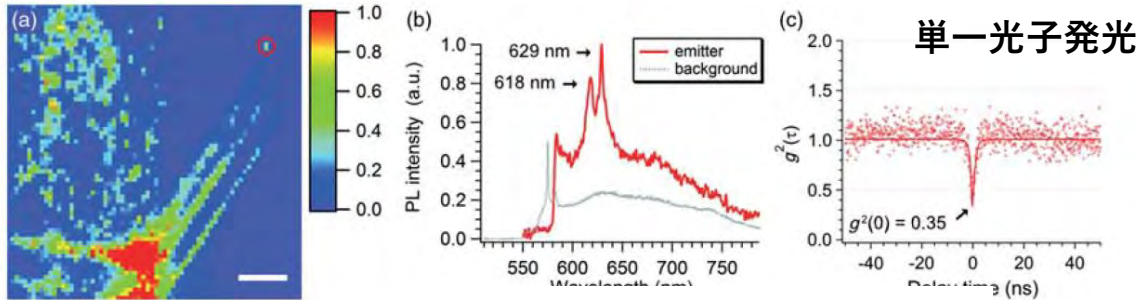
原子層のメリット

表面近傍で空間分解能の確保が可能

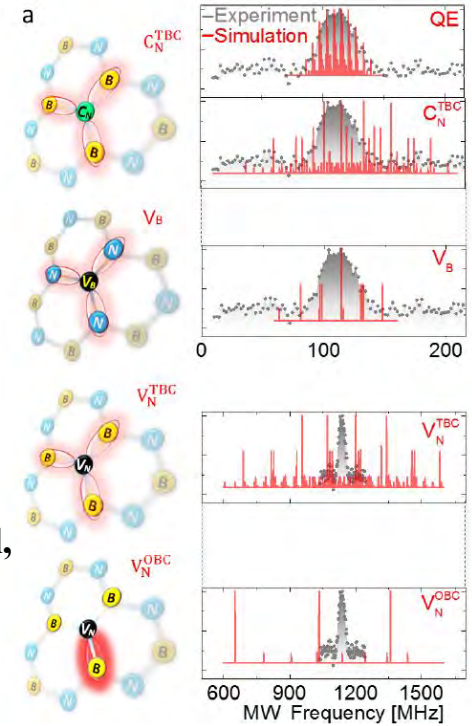


発光強度の磁場応答性を観測

A.L.Exarhous, L.C.Bassett, et al., Nat. Commun., (2019).

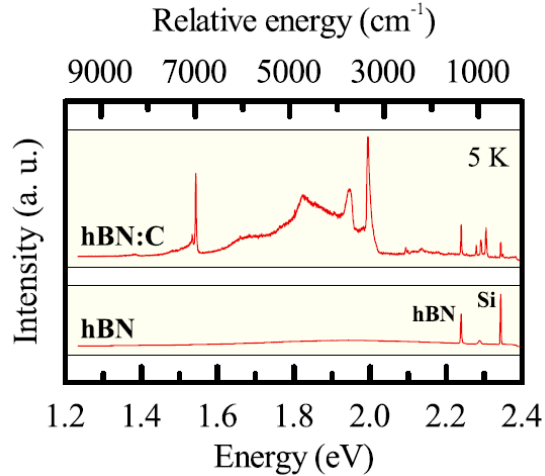


T.T.Tran, Phys.Rev.Appl.,5,34005(2016).



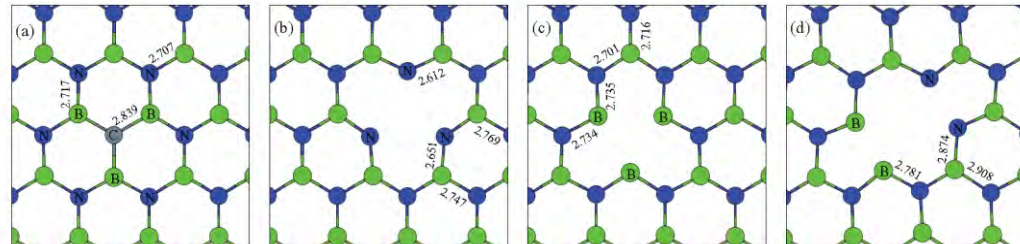
スピン由来の観測

N.Chejanovsky, TT, J.Wrachtrup,et.al, Nat.Mater.(2021).



hBN:C センター

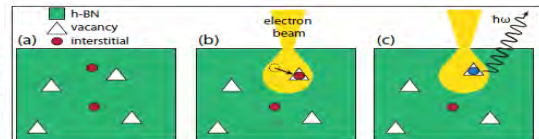
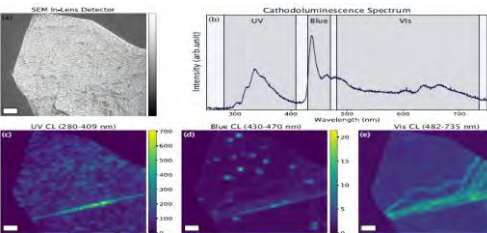
M.Koperski, TT, K.Novoselov,et.al., PNAS(2020).



格子欠陥の形成

スピン由来の発光→量子応用へ 欠陥構造の解釈、制御で競合

2016以降～ 60報以上(欧米、豪が先行)



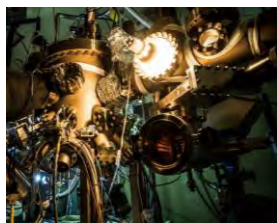
B.Shevitski, TT,KW, A.Zettle,et.al, PRB. 100,1555419(2019).

高品位量子ドットを用いた次世代量子光源の開発

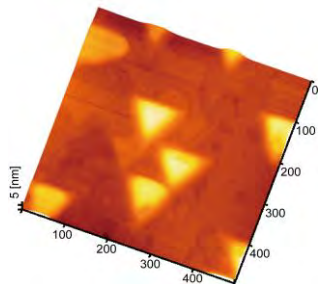
- 半導体微結晶（量子ドット）は量子もつれ光子対をオンデマンド発生可能。量子ドット作製技術を高度化し、汎用量子光源の実現を目指す。

量子ドット作製技術の発展と応用

- NIMS独自の量子ドット形成手法液滴エピタキシー(1991)を高度化。形状対称性の飛躍的な向上に成功 (2012)

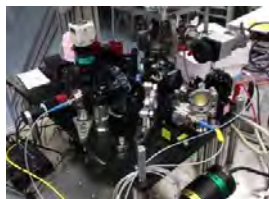


分子線エピタキシー装置

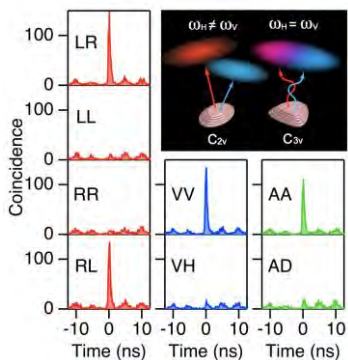


[111]面成長GaAs量子ドット

- 理想量子ドットを使い量子もつれ光子対の発生に成功。世界最高値の忠実度を観測 (2013)



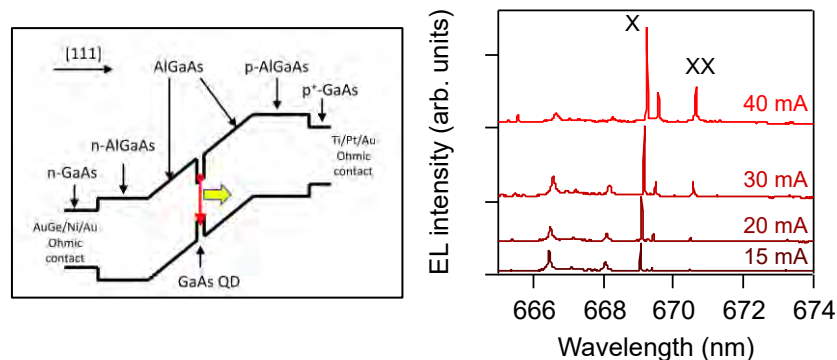
量子もつれ評価装置



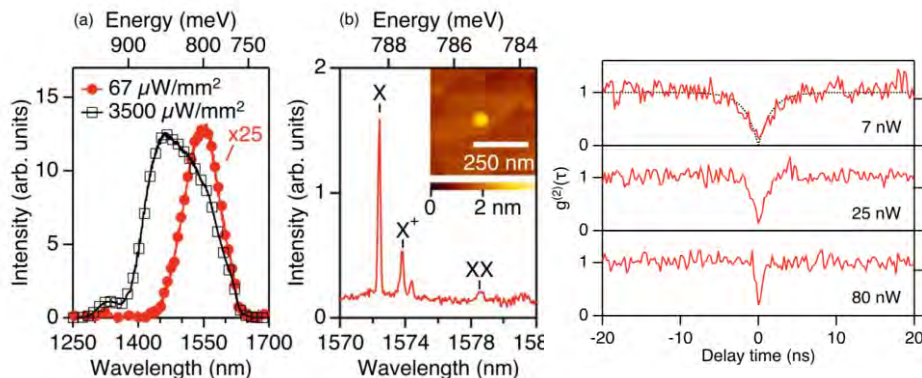
光子相関の測定
古典限界を超える相関を観測

量子光源化に向けた試み

- 量子ドットLEDを実現。外部レーザー要らずに電流駆動で量子もつれを発生 (2020)



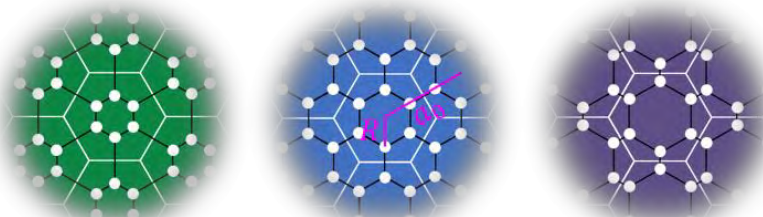
- InP基板で波長1.55μm量子ドットを作製。単一光子発生を実証 (2021)



大規模量子インターネットの将来実現を見据え、汎用もつれ発生デバイスに展開する

先進トポロジカルレーザーの開発

□ NIMS発トポロジカルフォトンクス理論



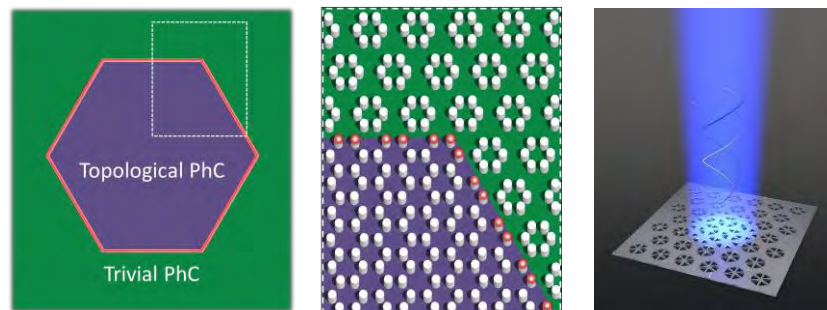
Trivial PhC Photonic Graphene Topological PhC

✎ 光子量子スピンホール効果発現

✎ 半導体トポロジカルフォトンクスへ寄与

LH Wu and X Hu: PRL **114**, 223901 (2015)

□ トポロジカルレーザーTCSELの開発 (Topological Cavity Surface Emission Laser)



X. Hu et al., PRB **103**, 245305 (2021)

X. Hu et al., PRL **127**, 209401 (2021)

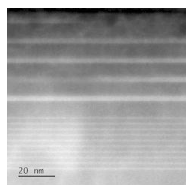
✎ 円偏光

✎ 光強度

□ GaN系発光物質合成



新規MOVPE装置



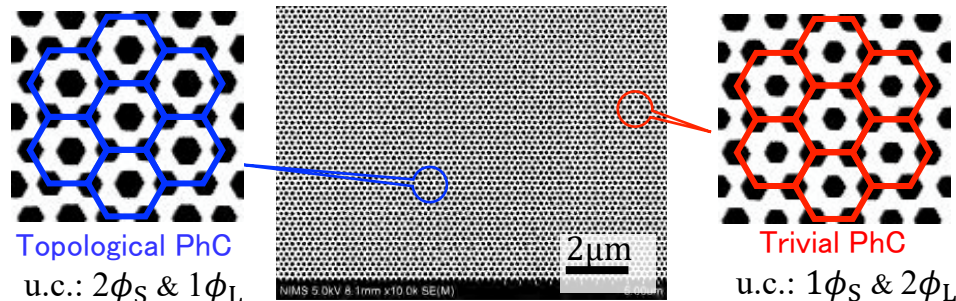
GaN/InGaN MQW



高効率緑色発光

L. Sang et al., APL **119**, 202103 (2021)

□ 緑光TCSEL用フォトリソニック結晶のナノ加工



Topological PhC
u.c.: $2\phi_S$ & $1\phi_L$

Trivial PhC
u.c.: $1\phi_S$ & $2\phi_L$

$$\bar{\phi} = 150\text{nm}; \phi_L - \phi_S = 25\text{nm}; d_{\min} = 40\text{nm}$$

M. Imura et al., AIP Advances **12**, 015203 (2022)

量子技術イノベーション

新量子機能の開拓

量子通信

量子計測・センシング

量子情報処理

量子マテリアル基礎基盤研究からの貢献

・量子ドットもつれ光源の開発

フォトニクス技術開発

・ダイヤモンド量子センサ基盤技術開発

・物質トポロジー探索と革新的フォトニクス量子機能開発

トポロジカル電子技術開発

・トポロジカル物質及びボルテックス制御

・二次元原子層積層制御による量子マテリアル創製

・トポロジカル効果による磁気記録材料開発

・トポロジカル量子ビット実現を目指した材料基盤の構築

量子通信



量子ドット開拓



量子計測・センシング



NVセンター
ポストNV



量子情報処理



qビット開拓



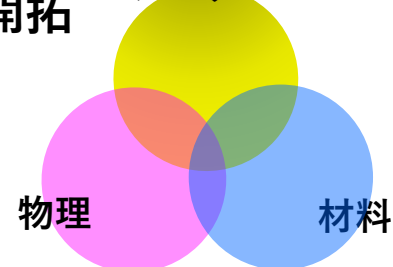
新量子機能の開拓



トポロジカル材料



システム



量子技術者

事業性(動作温度、環境負荷)、コスト(原材料、プロセス(含合成、加工))

量子材料基盤の構築：正しいGoalの選択(社会、国際情勢)

分業を前提とした適切な人材の配置と連携体制の掌握・統括

物理屋

量子機能の検証

コンセプトの拡張、アナロジーの展開

・量子機能のモデル化、提案

・コヒーレンスの評価、緩和機構の解明

・従来素子の高品位化

・新物質・材料設計

・評価技術の高度化

システム評価者との連携

材料屋

個人の発想、センス オリジナリティへの拘り

・主たる不純物は何か？

・表面準位、欠陥の理解

量子マテリアルに限らない

・高純度単結晶

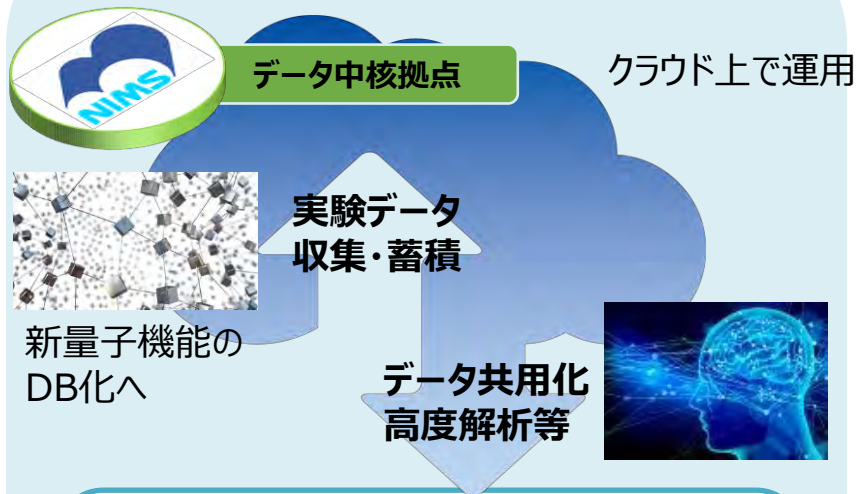
・大面積、薄膜化

・界面制御

職人芸/AI

新規カラーセンター探索と量子発光材料としてのデータベースの構築

マテリアルDXプラットフォームの利活用へ



実験データ取得

- ・NIMS研究グループ
- ・国プロ (ARIM等)



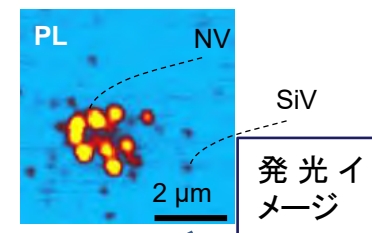
自動測定：多彩な量子発光材料

カソードルミネッセンス：

- 電子線によりワイドバンドギャップエネルギーを直接励起
- 深紫外領域から近赤外領域の発光スペクトル
- サブ μm レベル高分解能イメージング



例1) 分光イメージング ダイヤモンド発光分布

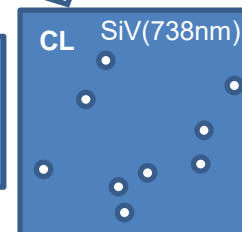
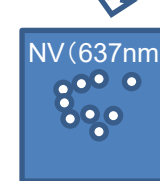


例2) ワイドエリアイメージング h-BN単結晶発光分布



従来法(ファイバー結合方式)の最大観察

本仕様(ミラー結合方式)広い領域を一度に観察できる



分光イメージ
(欠陥分布)