

超低抵抗を実現！ ダイヤモンドパワー半導体の 革新的製造技術

神奈川大学 理学部 理学科
准教授 星野 靖

2026年1月13日

自己紹介 & 研究経歴

- | | |
|---------------|-----------------------------------|
| 2008年 - 現在 | 神奈川大学 理学部 |
| 2007年 - 2008年 | 立命館大学 総合理工学研究機構 |
| 2005年 - 2007年 | パリ第6・7大学ナノサイエンス研究所
& 京都大学工学研究科 |

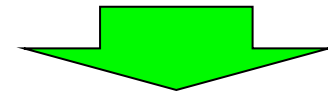
加速器を用いた新規材料開発や材料分析

研究経歴 (2008年~ @神奈川県)

加速器を用いた新規材料開発や材料分析

2008年@神奈川県

イオンビーム照射・分析技術



シリコン, SOI(silicon on insulator), ダイヤモンドなどの
半導体材料の高機能化の研究

ダイヤモンドパワー半導体の製造技術の革新

ホットイオン注入・照射技術を用いた
ダイヤモンドへの不純物ドーピングとドーパントの活性化

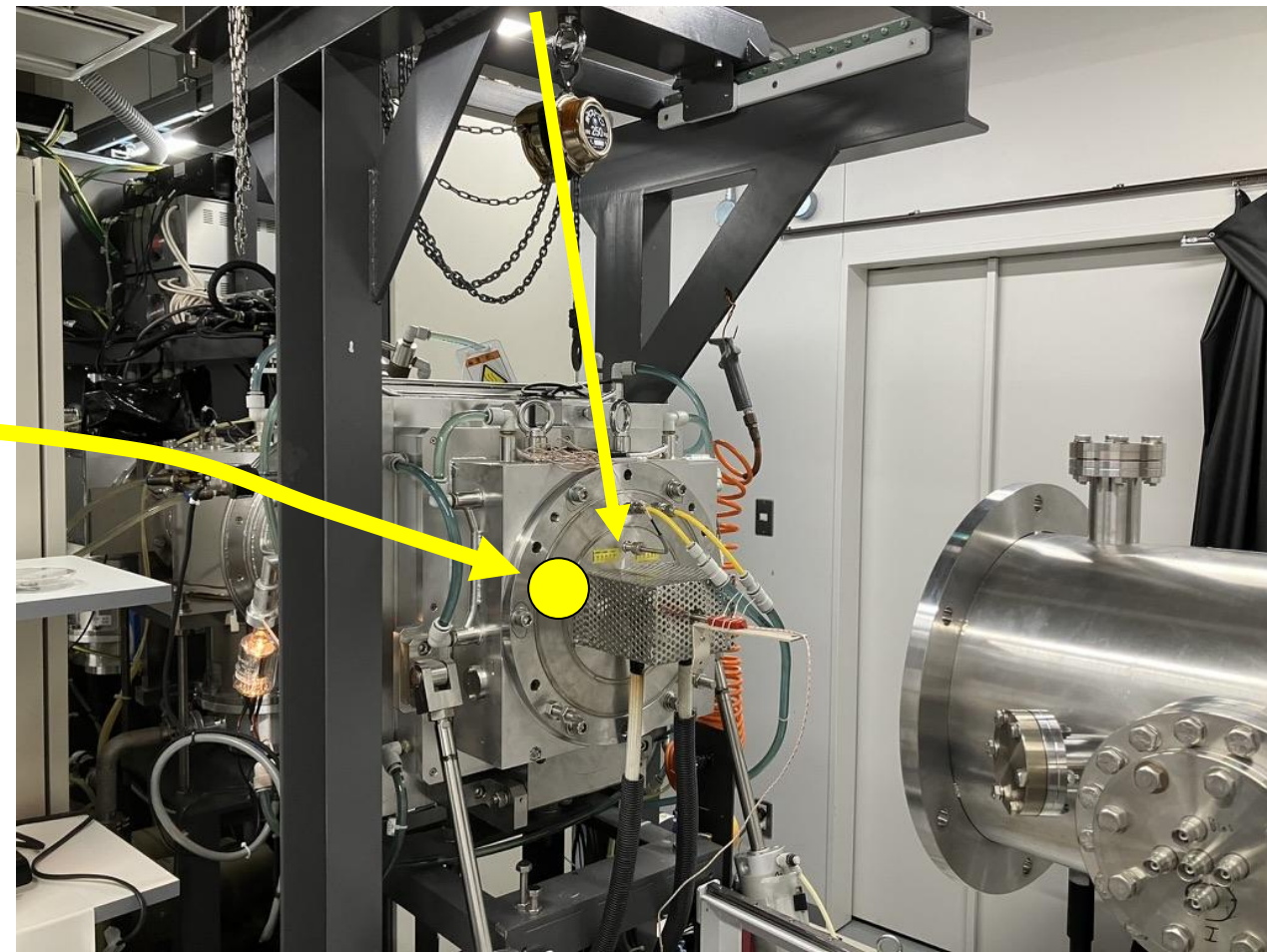
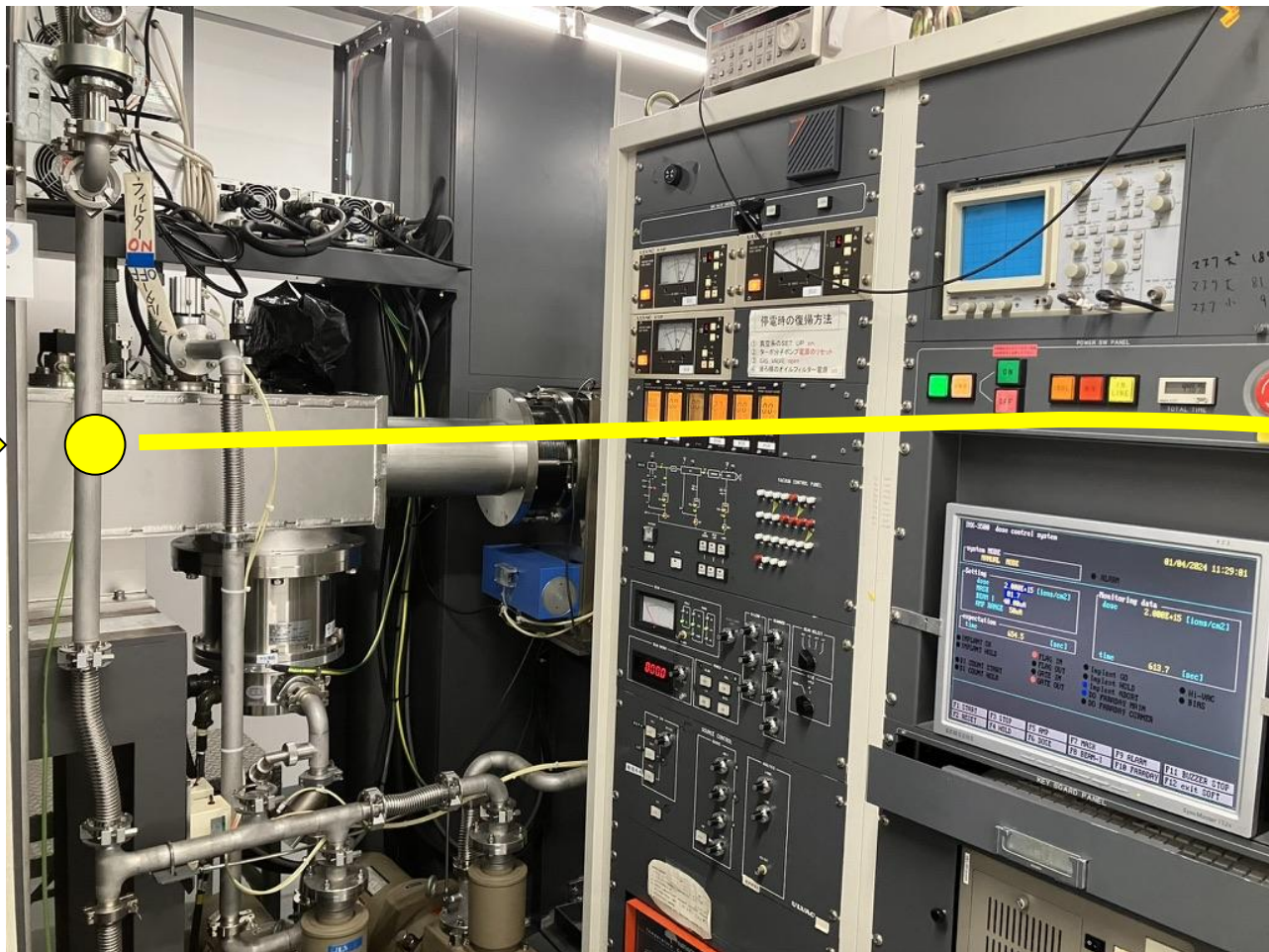
2台のイオン加速器@神奈川大学

① 200 kV イオン注入加速器

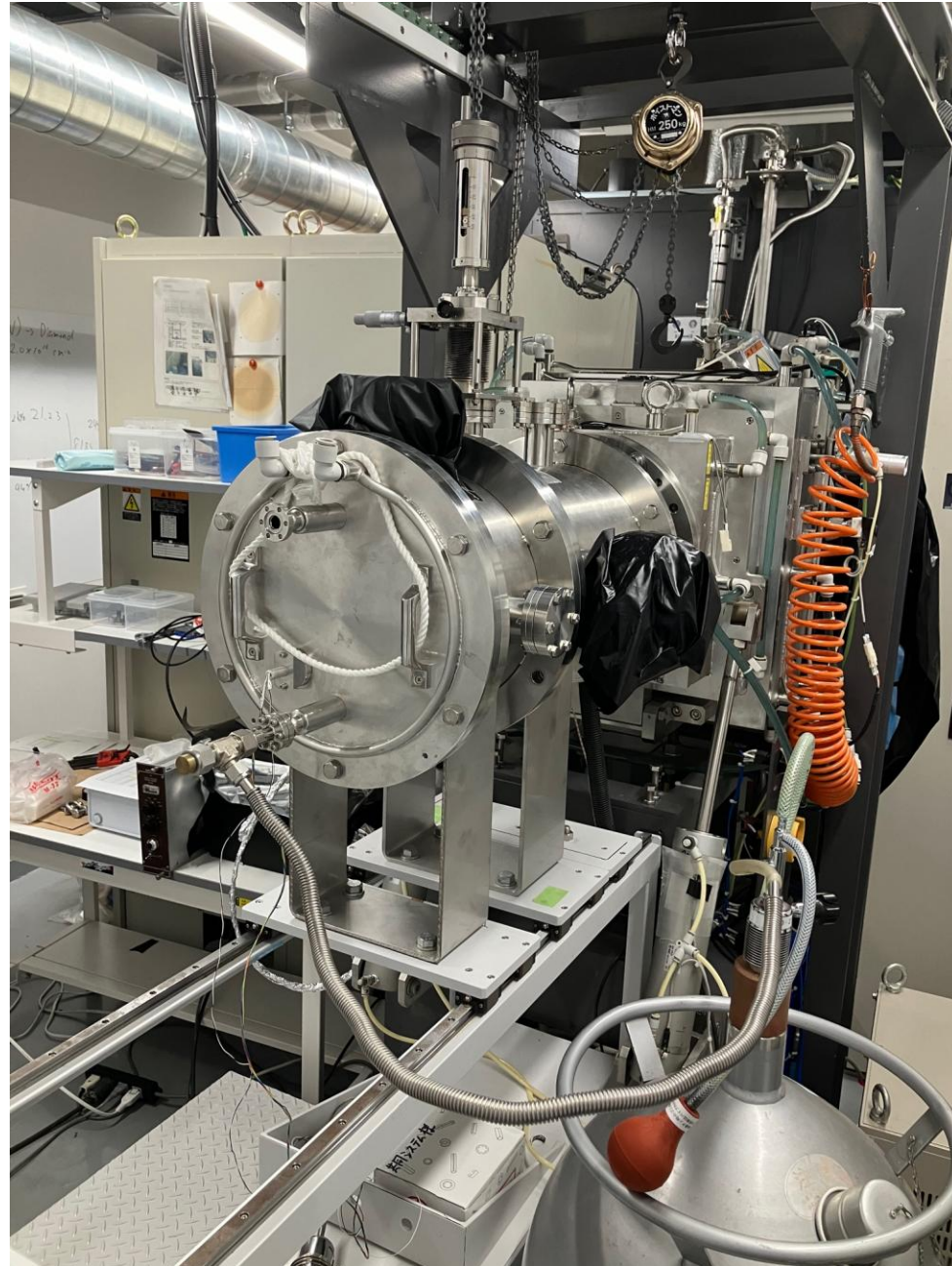
加速器制御盤

照射部(試料台)

イオン源
↓



① 200 kV加速器の仕様



主な用途: イオン注入・イオンビーム照射

- イオン種: H, He, B, C, N, O, F, Ne, Al, Si, P, S, Ar, Ti, Fe, Co, Ni, Ge, As, Mo, Kr, Xe, W (実績)
- 照射エリア: 10 cm ϕ
- エネルギー: 5 keV ~ 200 keV
- 最大電流値: 数100 μ A (for B⁺ ion)
- 基板温度: 液体窒素温度 ~ 1000°C

神奈川県大学加速器の大きな特徴

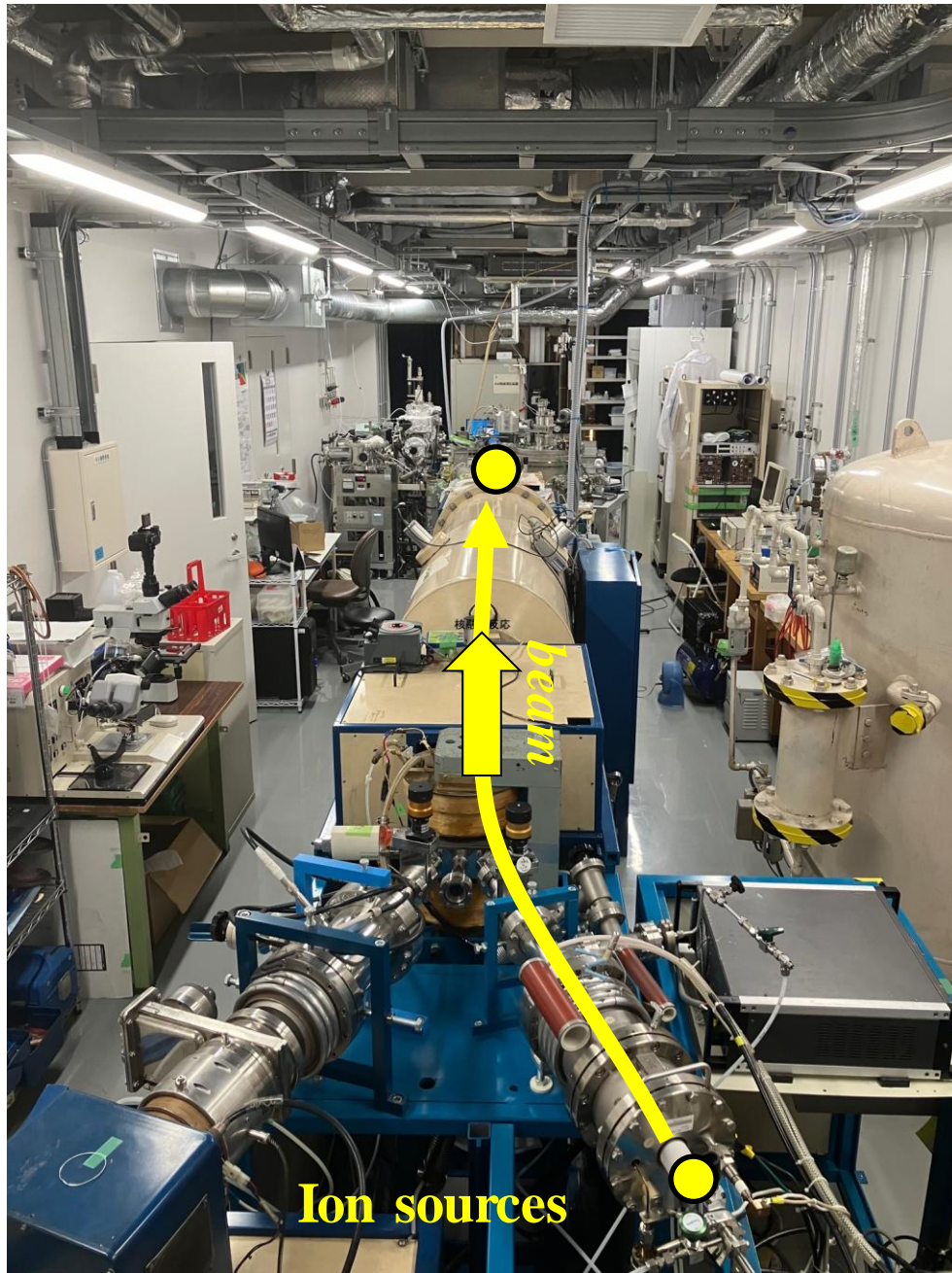
② 1 MV タンデム加速器の仕様

主な用途：高エネルギーイオン注入・照射

- イオン種： H, He, Li, B, C, N, O, Si, P など
- 照射エリア： 2.5 cm ϕ
- エネルギー： 400 keV \sim 3 MeV (飛程: $\sim \mu\text{m}$)
- 最大電流値： \sim 100 nA (イオン種による)
- 基板温度： 室温 (\sim 500°C: 調整中)

2本のビームライン:

- ① MeV級イオン注入, ビーム照射
- ② イオンビーム分析: RBS, NRA, PIXE, ERD分析



Ion sources

イオン加速器の材料科学・工学への用途

イオンビーム照射・注入による機能性創出・構造変化・欠陥制御

- 半導体への不純物ドーピング
- 欠陥生成・回復
- 結晶化促進

イオンビーム注入による非破壊・定量分析(構造・組成深さ分析)

- ラザフォード後方散乱分析(RBS)
- 弾性反跳検出分析(ERD)
- 核反応分析(NRA)

イオン加速器の材料科学・工学への用途

イオンビーム照射・注入による機能性創出・構造変化・欠陥制御

- **半導体への不純物ドーピング**
- 欠陥生成・回復
- 結晶化促進

イオンビーム注入による非破壊・定量分析(構造・組成深さ分析)

- ラザフォード後方散乱分析(RBS)
- 弾性反跳検出分析(ERD)
- 核反応分析(NRA)

半導体への不純物ドーピング

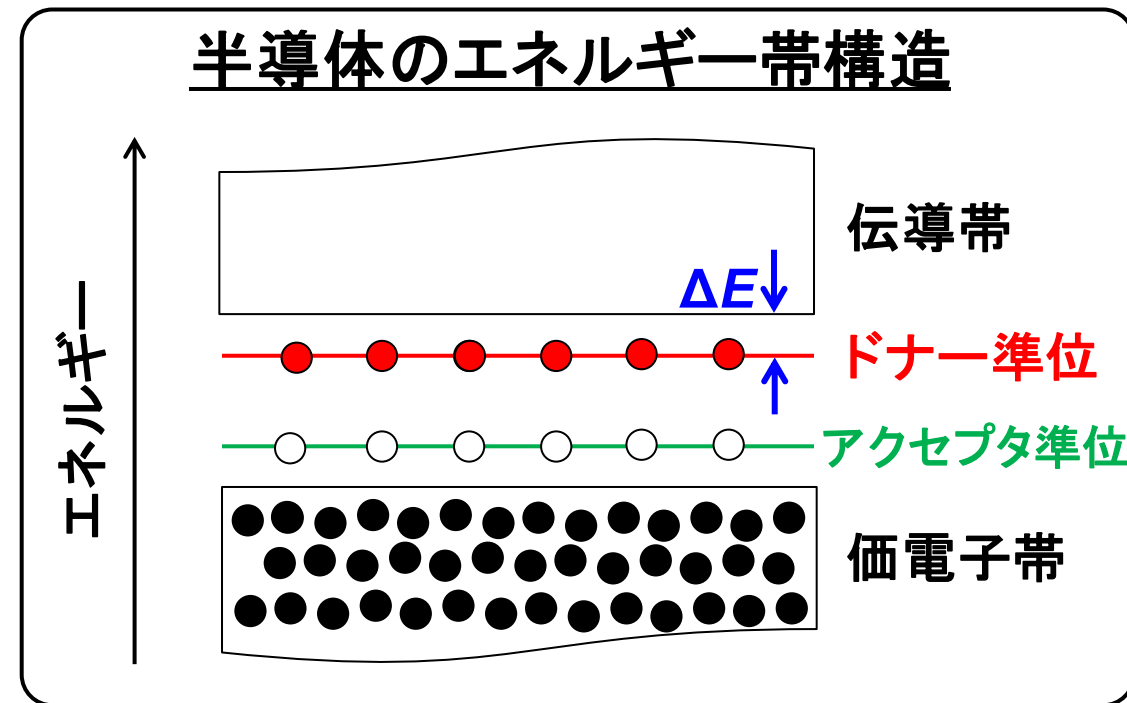
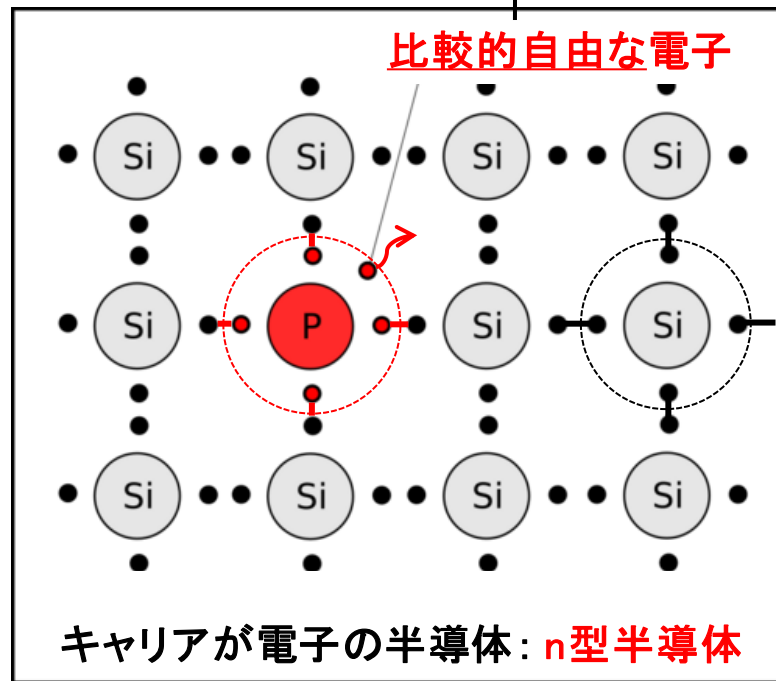
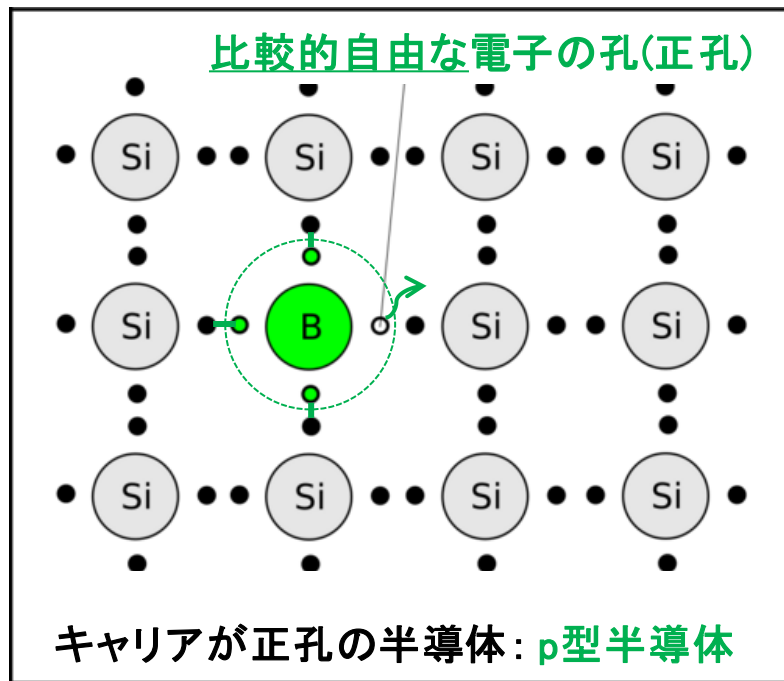
IV族元素基板に、**意図的に**(密度や深さ, 領域を制御して)
III族元素(p型半導体) 或いは V族元素(n型半導体)を添加

III族元素: アクセプター不純物
V族元素: ドナー不純物

比較的自由的な = 緩く原子と結合している



小さなエネルギーで伝導帯へ上がれる
(例)室温をエネルギーで表現すると, ~25 meV



半導体への不純物ドーピング

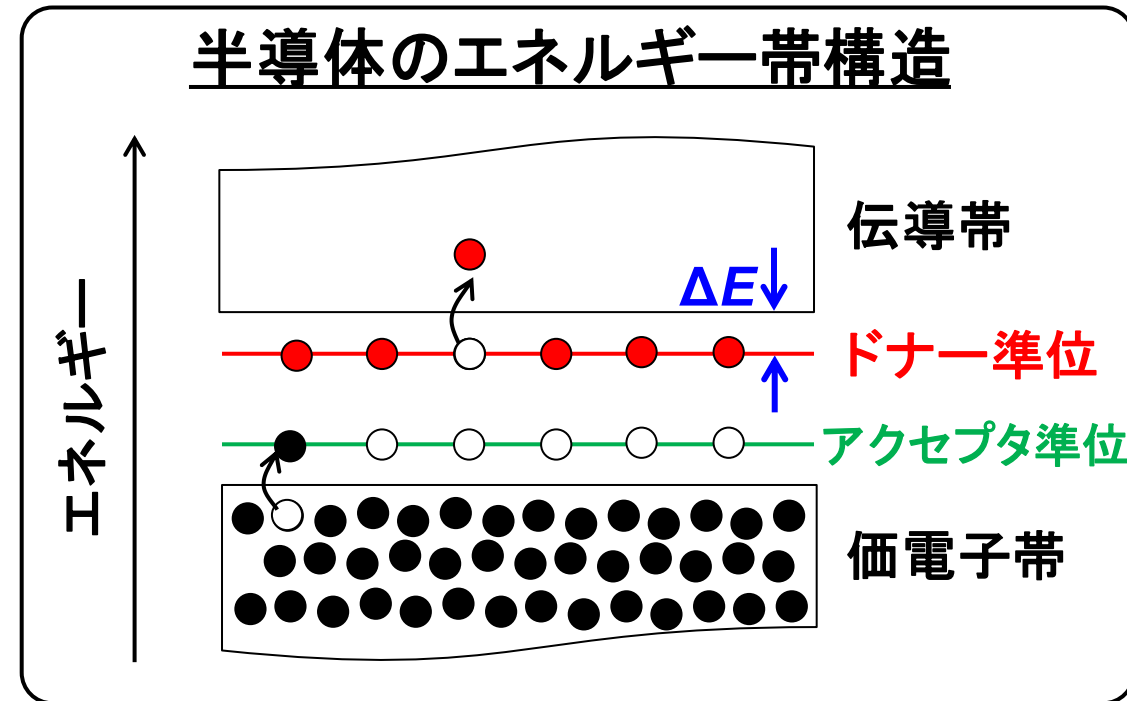
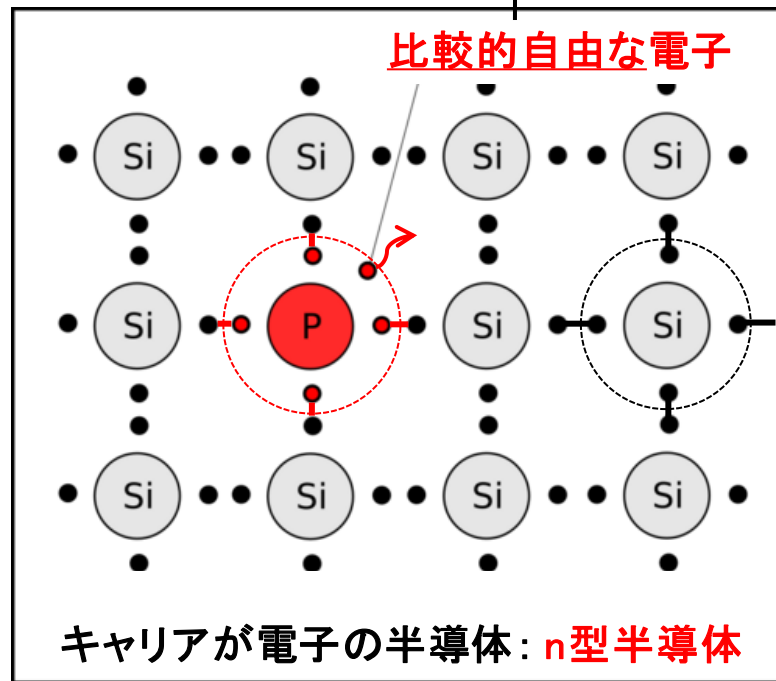
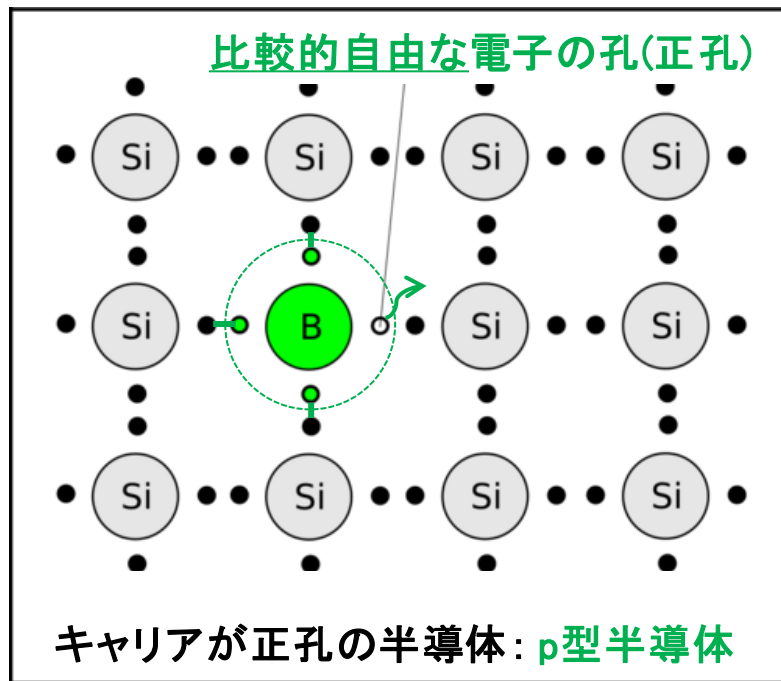
IV族元素基板に、**意図的に**(密度や深さ, 領域を制御して)
III族元素(p型半導体)或いはV族元素(n型半導体)を添加

III族元素: アクセプター不純物
V族元素: ドナー不純物

比較的自由的な = 緩く原子と結合している

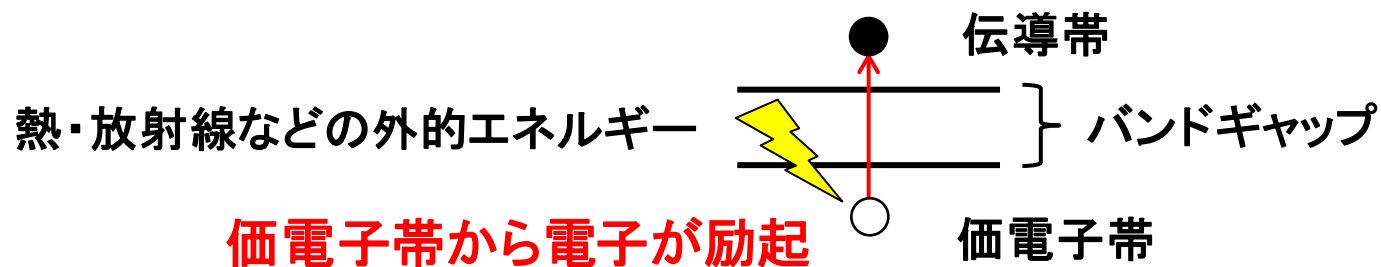


小さなエネルギーで伝導帯へ上がれる
(例)室温をエネルギーで表現すると, ~25 meV

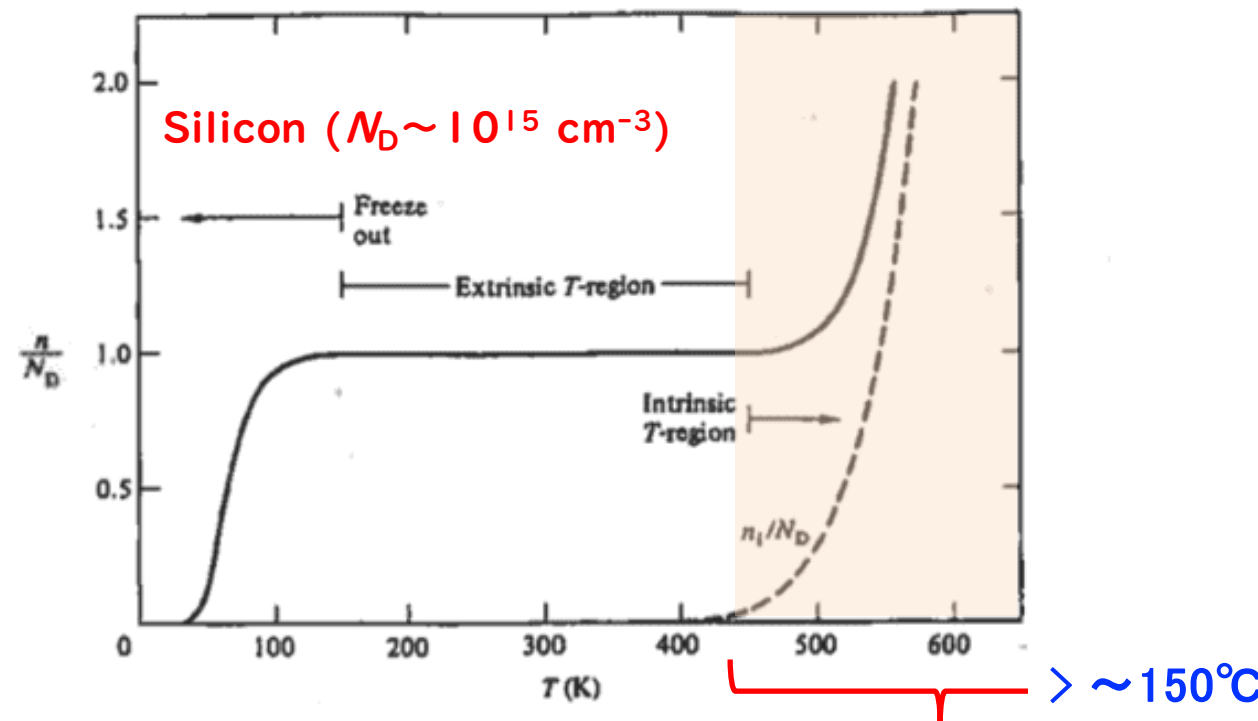
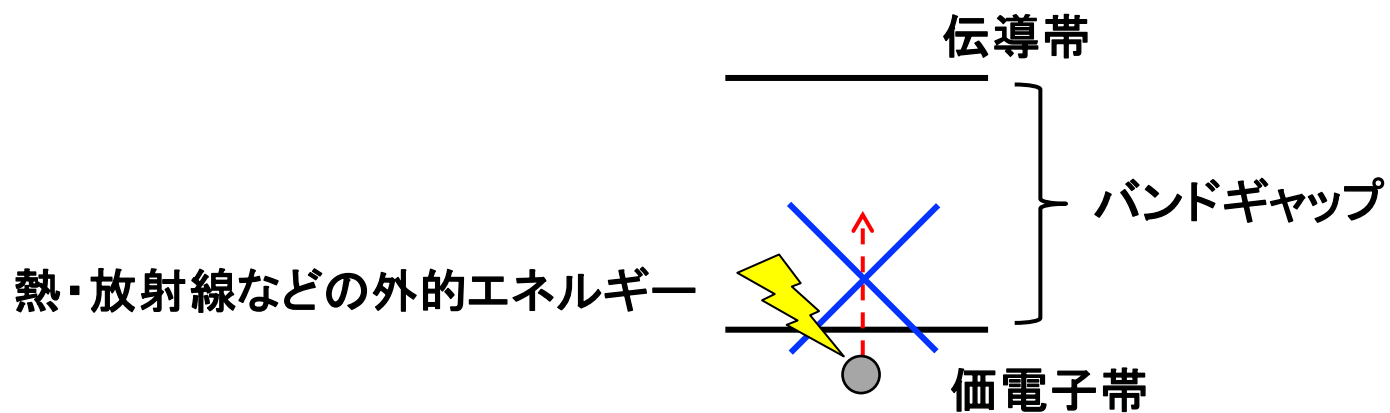


ワイドギャップ半導体

ナローギャップ半導体



ワイドギャップ半導体



シリコンでは、 100°C 以上での動作は難しい

ワイドギャップ半導体

	Si	4H-SiC	GaN	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	Diamond
bandgap (eV)	1.1	3.4	3.4	4.8	5.5

高温、高出力、放射線環境下での動作が期待

代表的な半導体の物性比較

	Si	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃	Diamond
bandgap (eV)	1.1	3.4	3.4	4.8	5.5
Electron mobility (cm ² /V·s)	1400	1000	1200	300	4500
Hole mobility (cm ² /V·s)	600	120	350	300	3800
Breakdown electric field (MV/cm)	0.3	2.8	2.5	unknown	10
Thermal conductivity (W/cm·K)	1.5	3.6	2.0	unknown	22

ダイヤモンドは、代表的な半導体材料の中で最も優れた特性



究極の省エネルギーデバイスとして期待

代表的な半導体の物性比較

	Si	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃	Diamond
bandgap (eV)	1.1	3.4	3.4	4.8	5.5
Electron mobility (cm ² /V·s)	1400	1000	1200	300	300
Hole mobility (cm ² /V·s)	600	120	350	300	300
Breakdown electric field (MV/cm)	0.3	2.8	2.5	unknown	10
Thermal conductivity (W/cm·K)	1.5	3.6	2.0	unknown	22

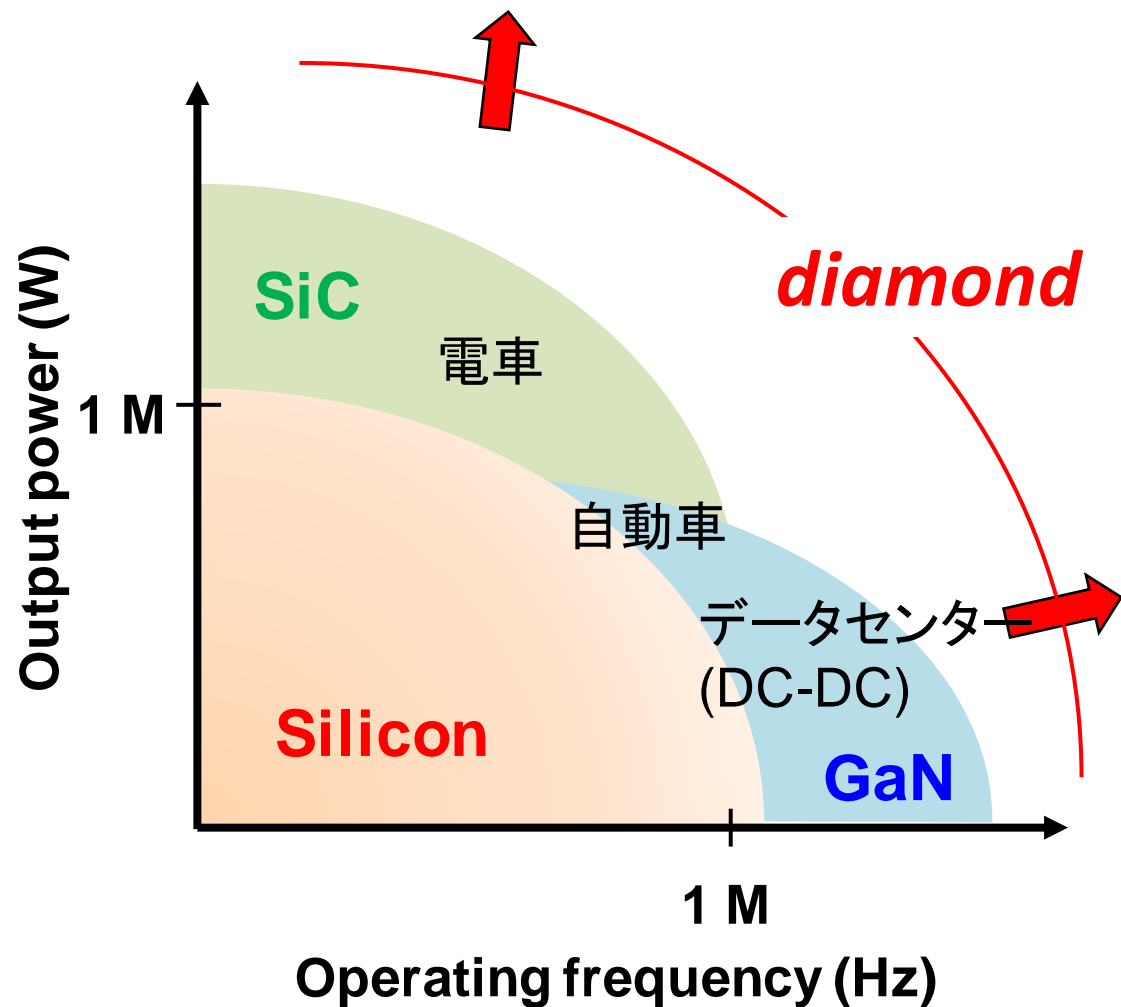
研究開発途上

ダイヤモンドは、代表的な半導体材料の中で最も優れた特性

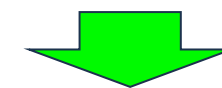


究極の省エネルギーデバイスとして期待

パワーデバイスの実用化例



SiC インバーターを搭載



小型化 → 省エネルギー (20~30%)

ダイヤモンドは、SiCやGaNを超えるポテンシャル

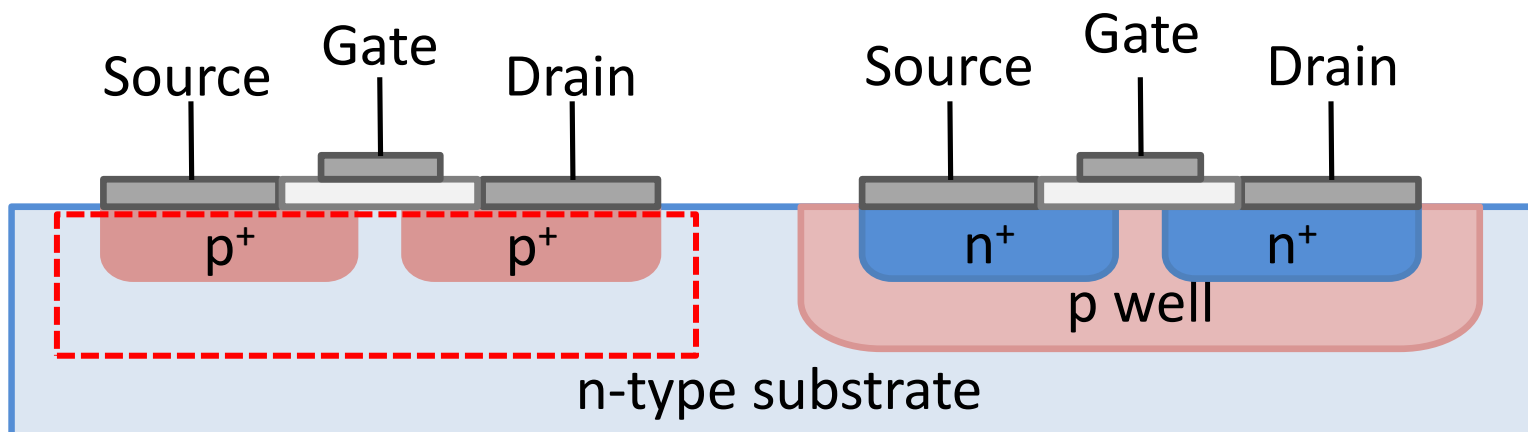
特にダイヤモンドの将来用途と優れている点

用途	有利な点
高耐圧・高電力デバイス	絶縁破壊電界強度が他を圧倒し、同じ耐圧であればオン抵抗を大幅に低減可能 = 損失低減, 冷却コスト削減 「高電圧MOSFET」「ダイヤモンドSBD」「高電力スイッチング用IGBT代替」
超高周波/高速電子デバイス	キャリア移動度が非常に高く、飽和キャリア速度も有利 「RFトランジスタ/HEMT」「超高速スイッチング素子」「ミリ波向けパワーアンプ」
高温動作デバイス	熱伝導率が非常に高く、バンドギャップが広い デバイスの熱耐性が高い→リーク低減 「自動車パワエレ」「宇宙・衛星用電子回路」「工業炉, プラズマ装置制御デバイス」
量子デバイス/センサー	ダイヤモンド中NVセンターなど、単一原子スケールの欠陥が光学的・磁氣的に利用 「高感度磁気センサー」「単一光子エミッター」「量子メモリー/多量子ビット」
放射線, 宇宙耐性デバイス	放射線耐性が非常に高く、過酷環境下で安定動作 「宇宙用パラエレクトロニクス」「原子炉用センサー・スイッチ」「医療用放射線装置向けデバイス」
高熱伝導デバイス	最高レベルの熱伝導性 「大電力デバイスのヒートスプレッダー」「高密度パワー集積回路での冷却用基板」 「電気自動車・産業用インバーターの高効率化」

従来の不純物ドーピング技術とその問題点

- 電極下の低抵抗化 (ソース・ドレイン電極直下への高濃度ドーピング)
- Well構造の形成

一般的な
デバイス構造



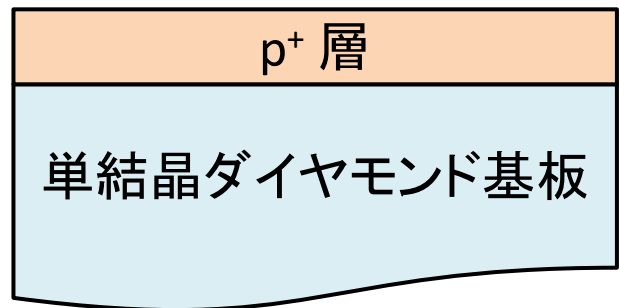
局所的な高濃度ドーピングが不可欠

ドーピング法	問題点	利点
拡散法	局所ドーピング困難 拡散係数が極めて低い	シンプルで廉価
CVD共ドーピング法	局所ドーピング困難でプロセスが複雑 高濃度ドーピングが難しい	欠陥が少ない 高キャリア移動度, 高活性化率
イオン注入法	イオン注入欠陥の低減と欠陥回復および活性化のためのアニールが必要	局所・高濃度ドーピング可能

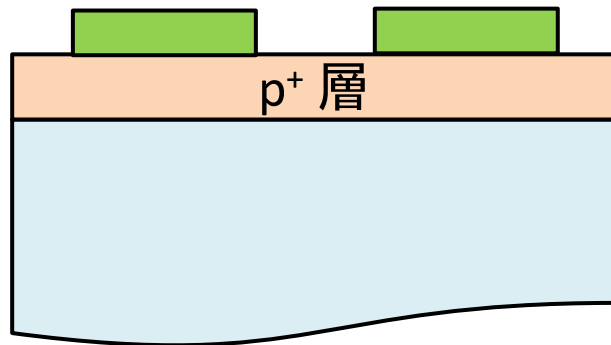
従来のドーピング技術とその問題点

【CVDドーピング法】

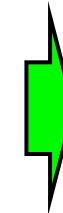
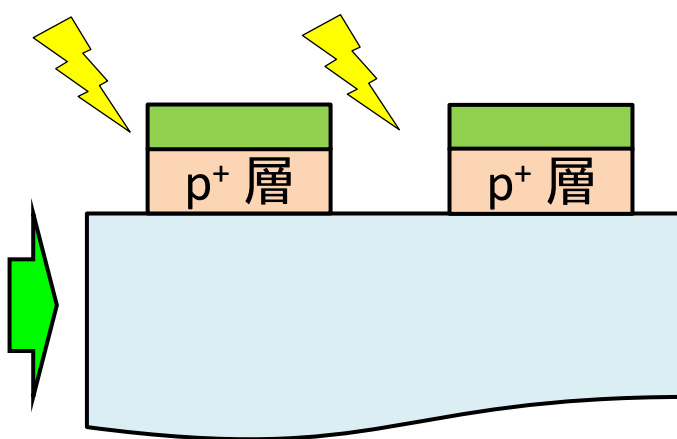
不純物Bを含むガスによる
 p^+ 薄膜層CVDエピ成長



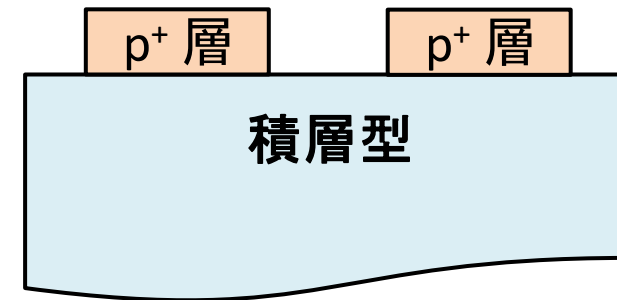
マスクパターン形成



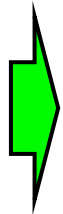
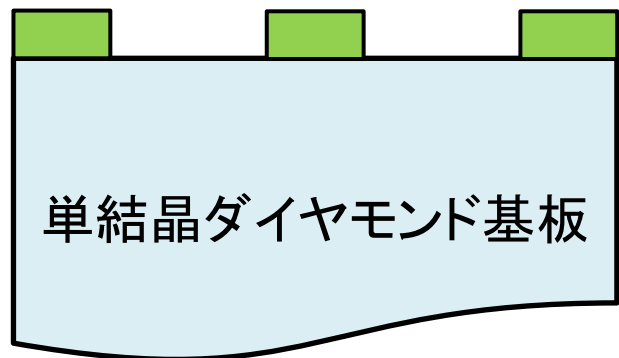
マスクを通して p^+ 層の部分除去



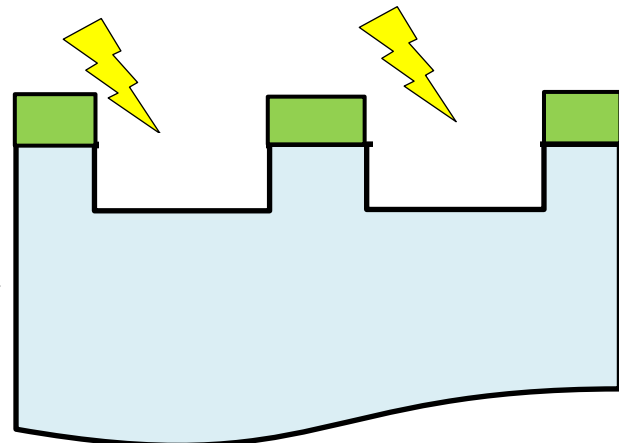
マスクパターン除去



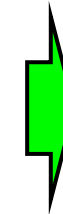
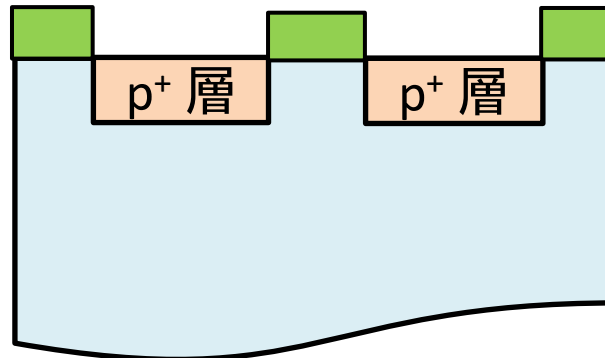
マスクパターン形成



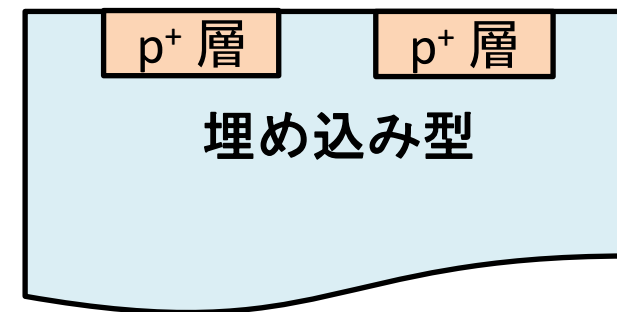
p^+ 層形成部にトレンチ形成



不純物Bを含むガスによる
 p^+ 薄膜層CVDエピ成長



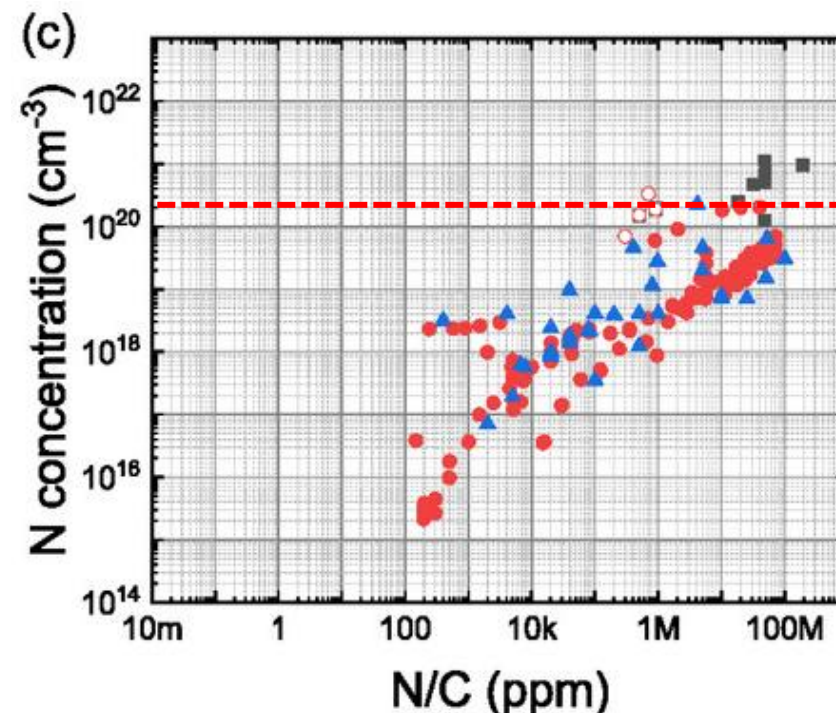
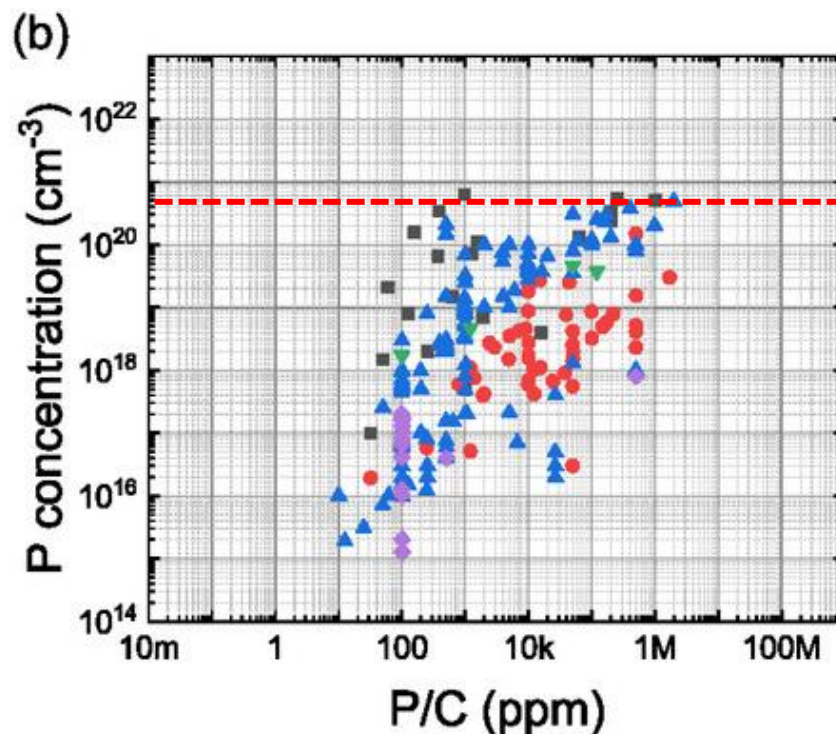
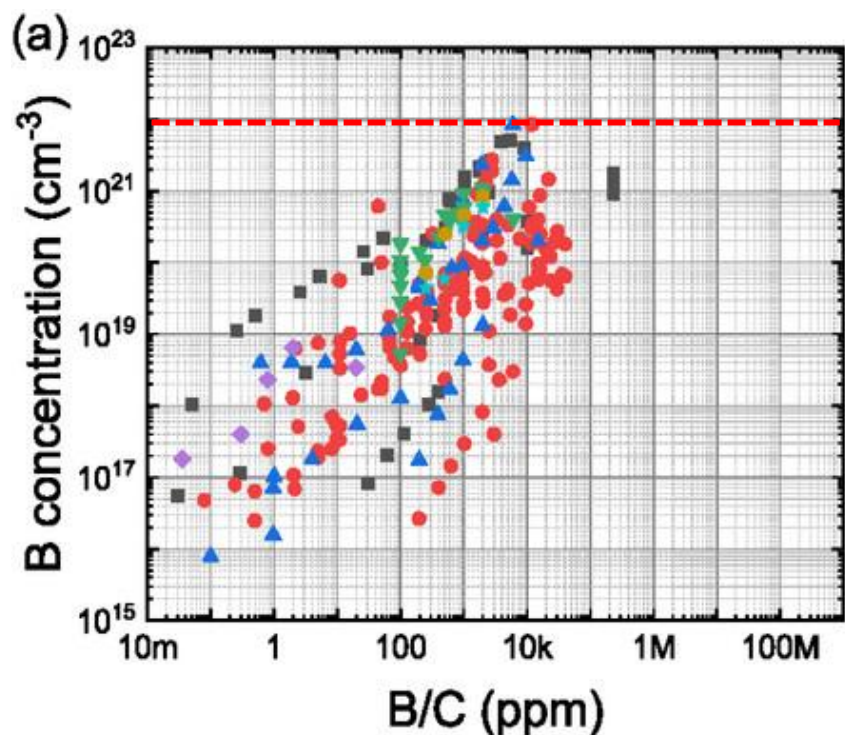
マスクパターン除去



従来のドーピング技術とその問題点

【CVDドーピング法】

高濃度ドーピングが困難

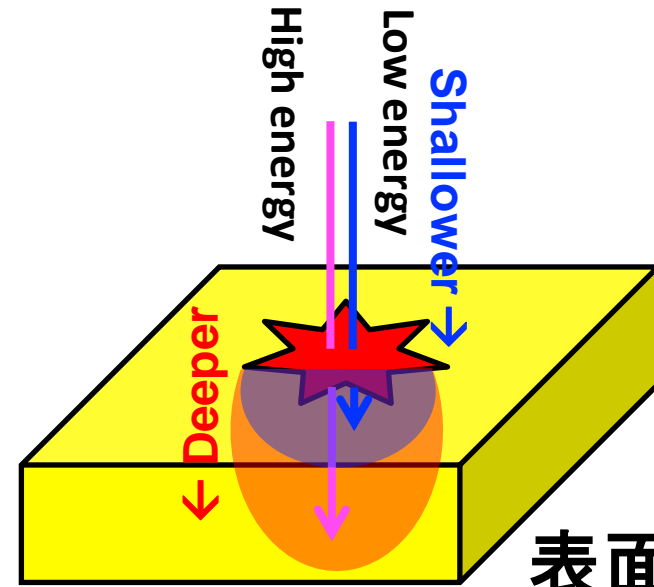
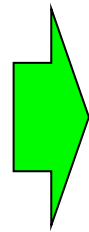
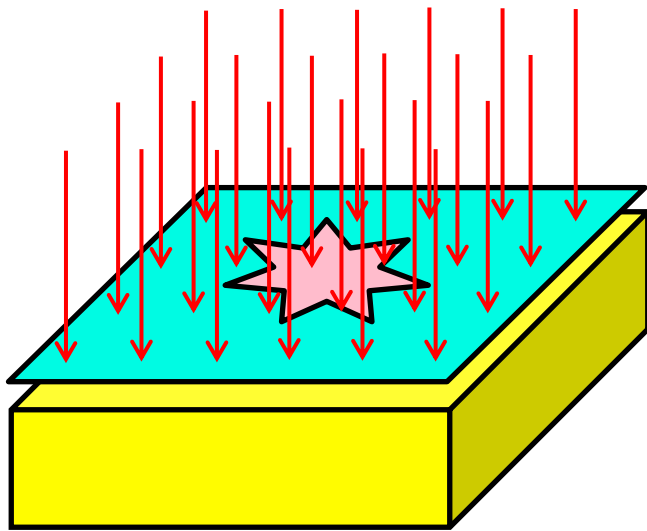


どう頑張っても、PやNは 10^{20} cm^{-3} 台が上限
→深い準位の不純物は、低抵抗化が困難

イオン注入ドーピングのメリット

(1) 領域選択ドーピング

(2) 深さ選択ドーピング



表面からミクロン深さまで

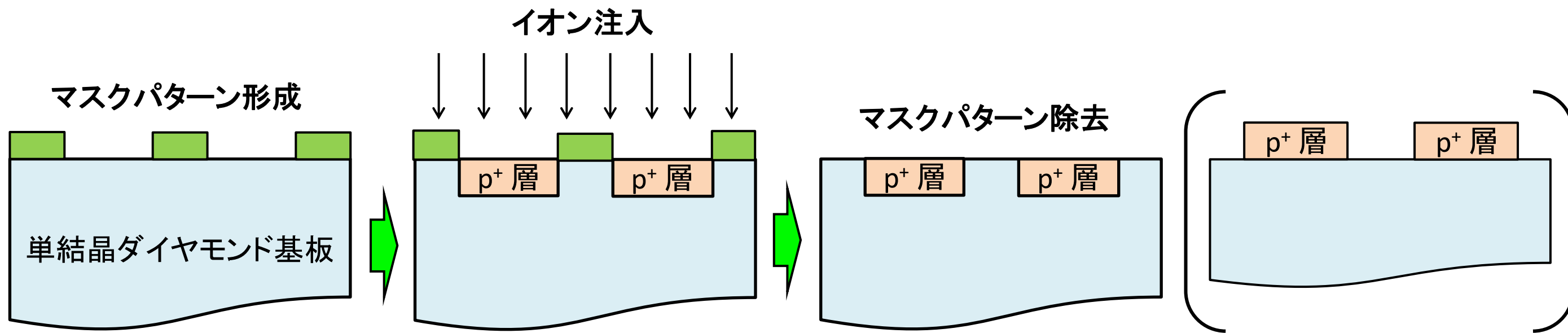
- どんな原子でも決められた領域に精度良く注入可能
- 広い領域に一度に短時間で注入可能



デバイス設計自由度が格段に向上

新技術の特徴・従来技術との比較

【ホットイオン注入ドーピング法】



深さは, 注入エネルギーで制御
濃度は, 注入量で制御
結晶性は, ホットイオン注入で維持

埋め込み型 ↔ CVD積層型

例えば, CVDドーピングでは困難な, 10^{21} cm^{-3} 濃度のNをドーピングする場合,
 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 程度のドーパース量で十分 (→注入時間: 数10分)

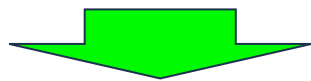
イオン注入ドーピングにおける従来の課題

イオン注入のデメリット

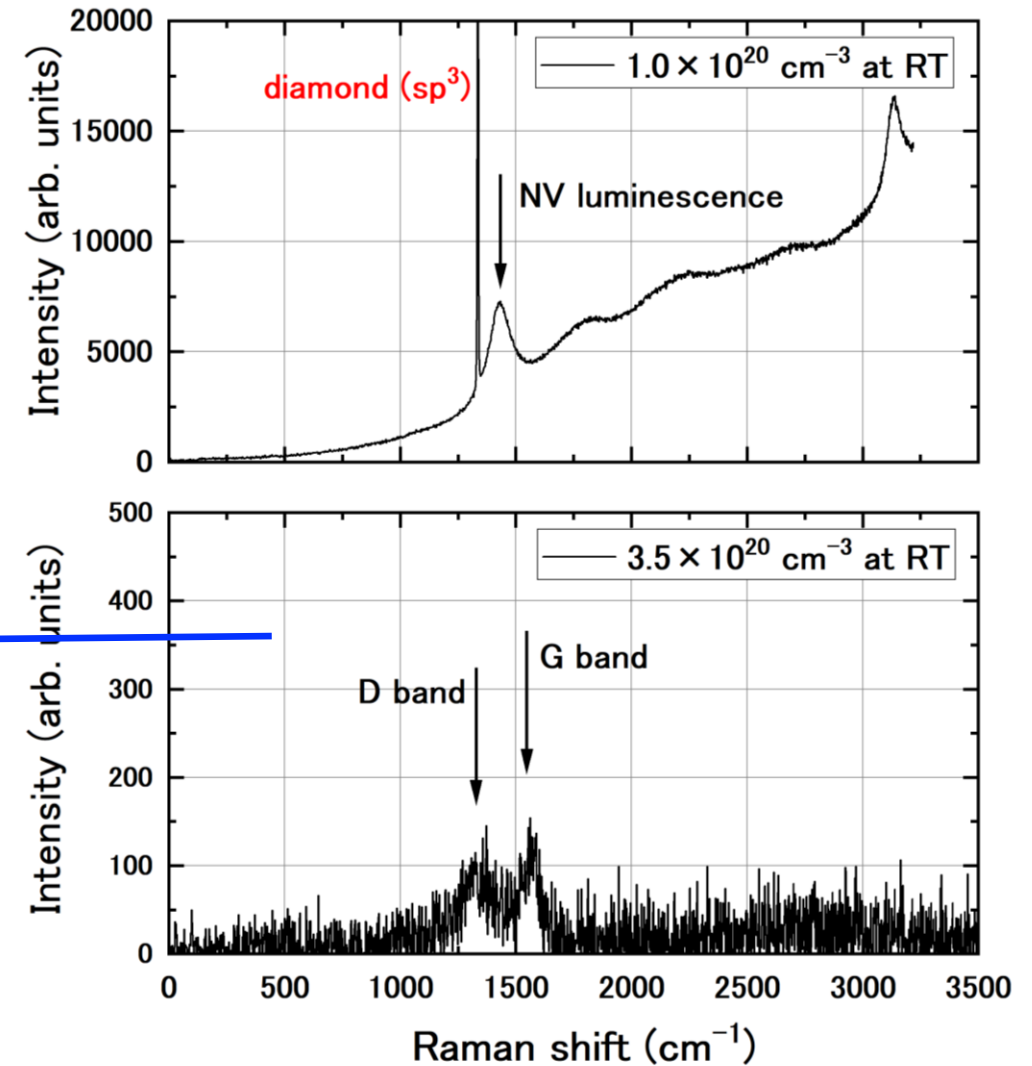
- 照射欠陥の生成
- 高温ポストアニール処理が必要

ダイヤモンドの場合、
一度、結晶性が破壊されると(臨界値を超えると)
元に戻すのができない
→ グラファイト構造への転移

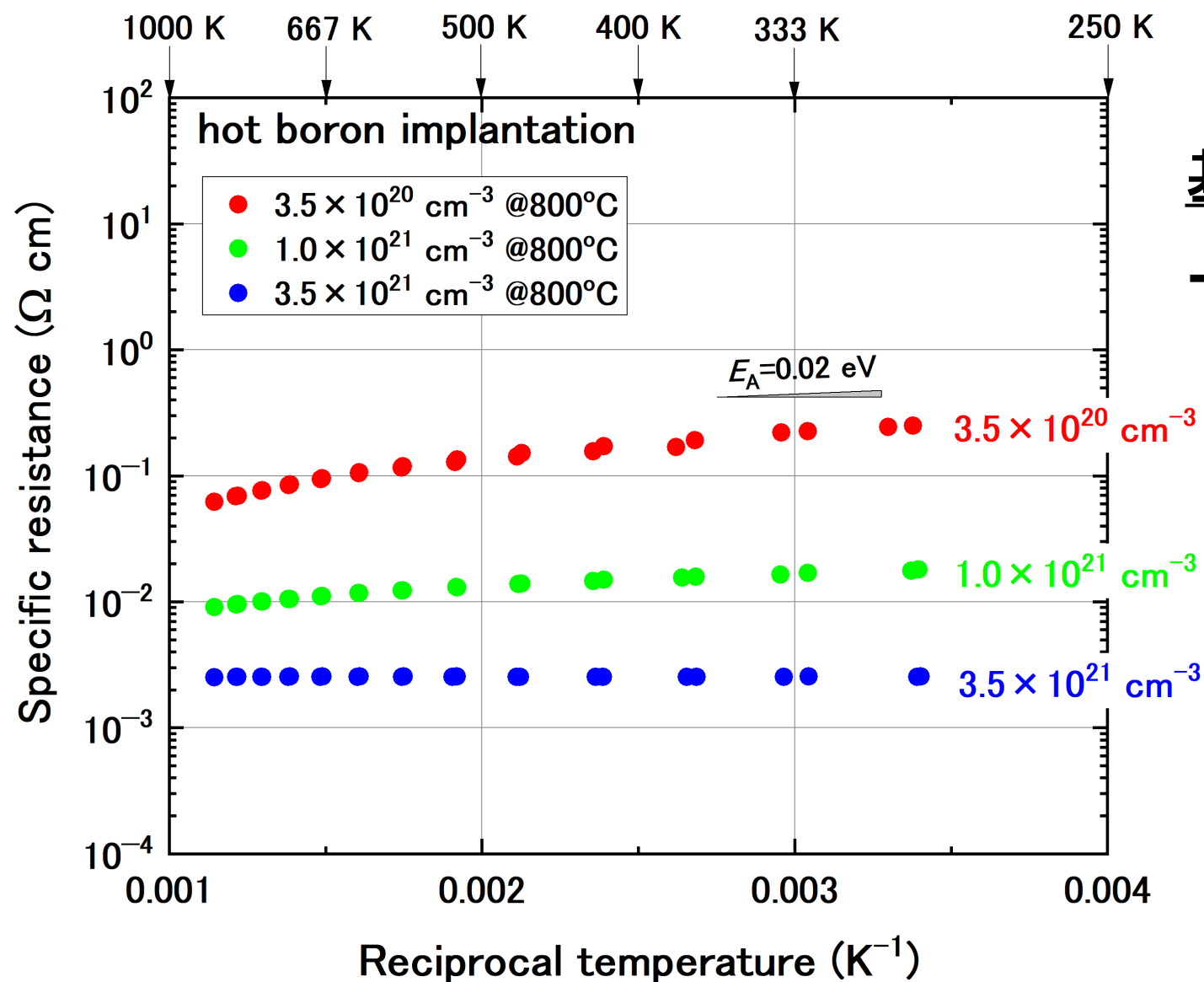
室温で $3.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 注入で **グラファイト化**



高濃度ドーピングを阻んでいる
→ **ホットイオン注入に注目**



高濃度Bホットイオン注入効果



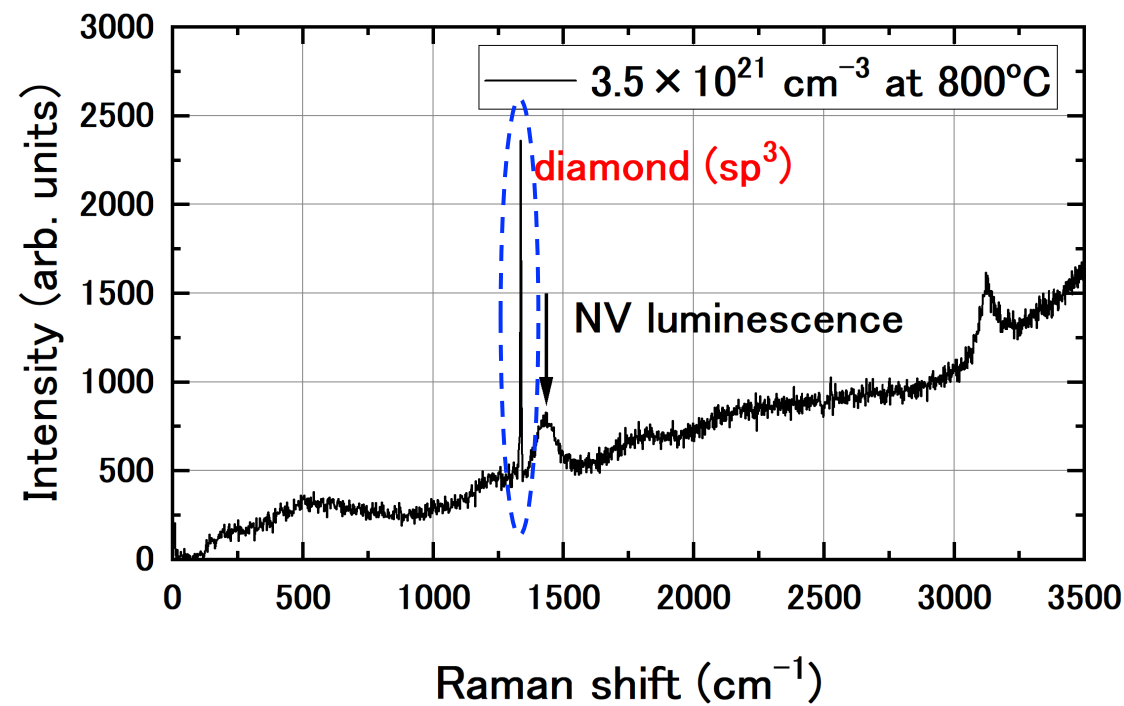
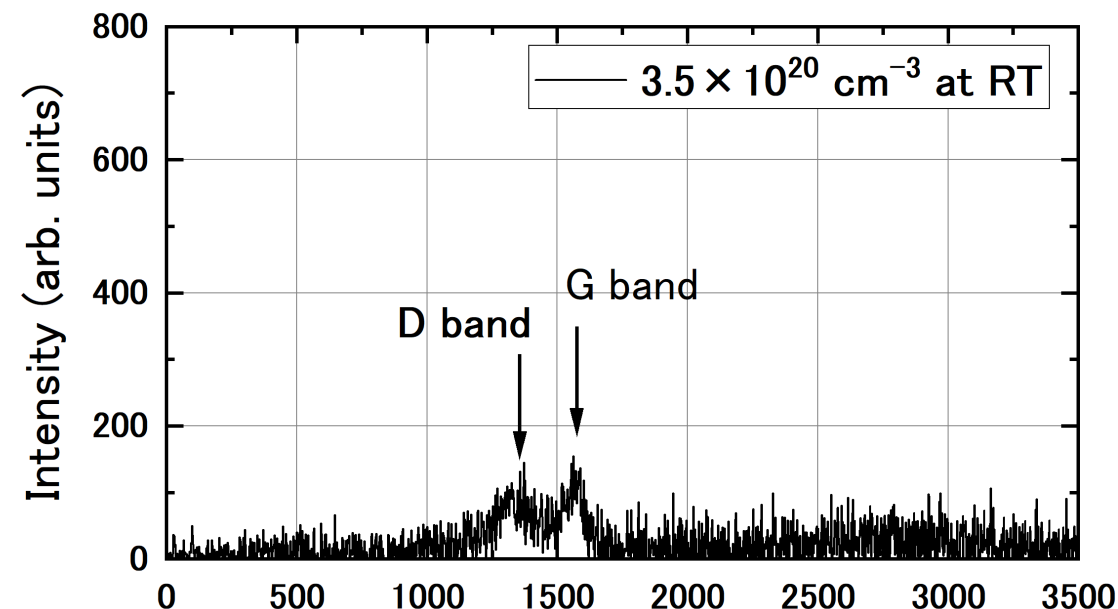
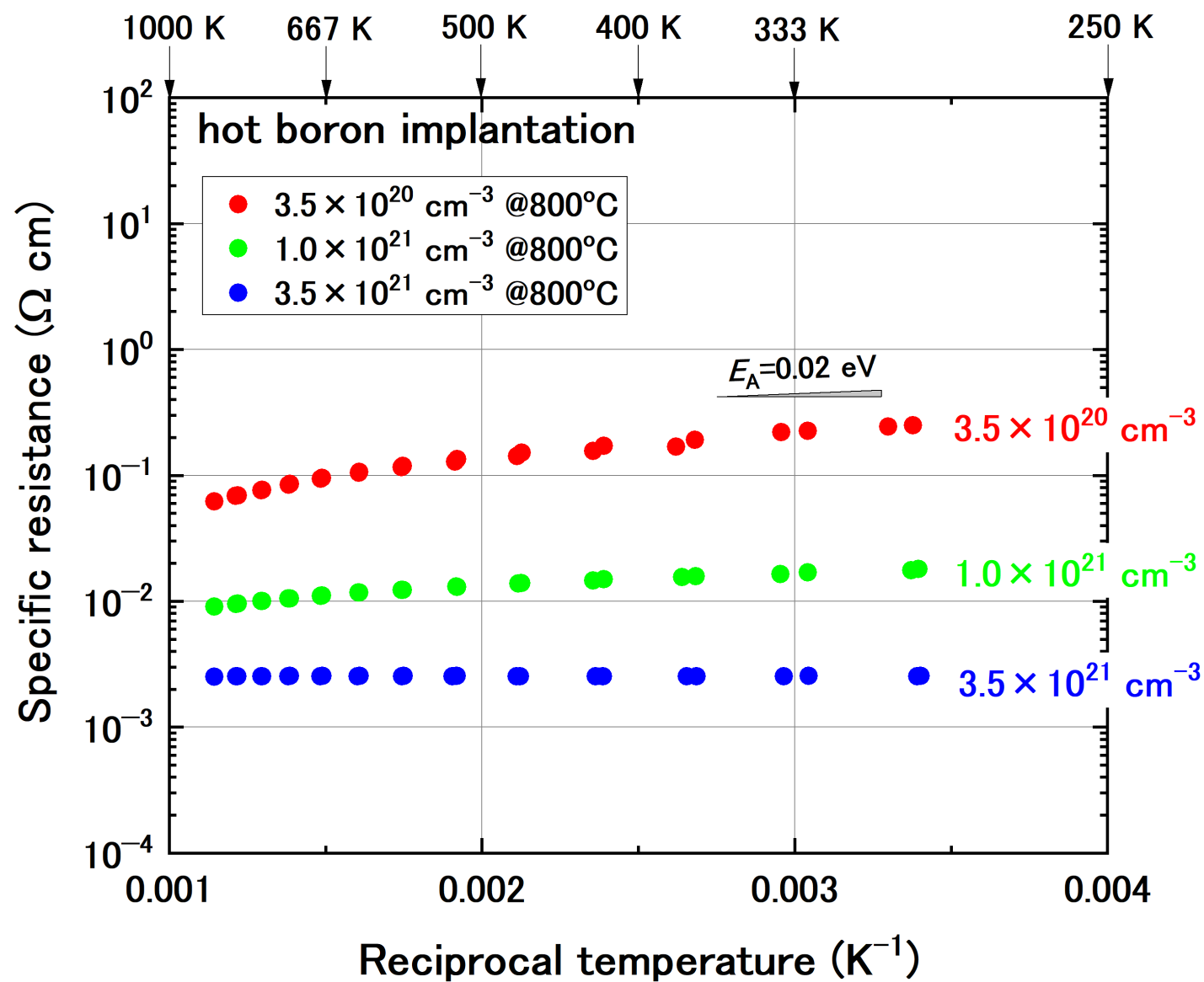
基板温度 400°Cと800°Cでのホットイオン注入

→ 基板温度依存性は、ほとんど見られず

ドーピング量に応じて抵抗は減少
(ドーピング量 $\times 10 \rightarrow$ 抵抗 $\times 1/100$)


3.5x10²¹ cm⁻³ で金属伝導に

高濃度Bホットイオン注入効果



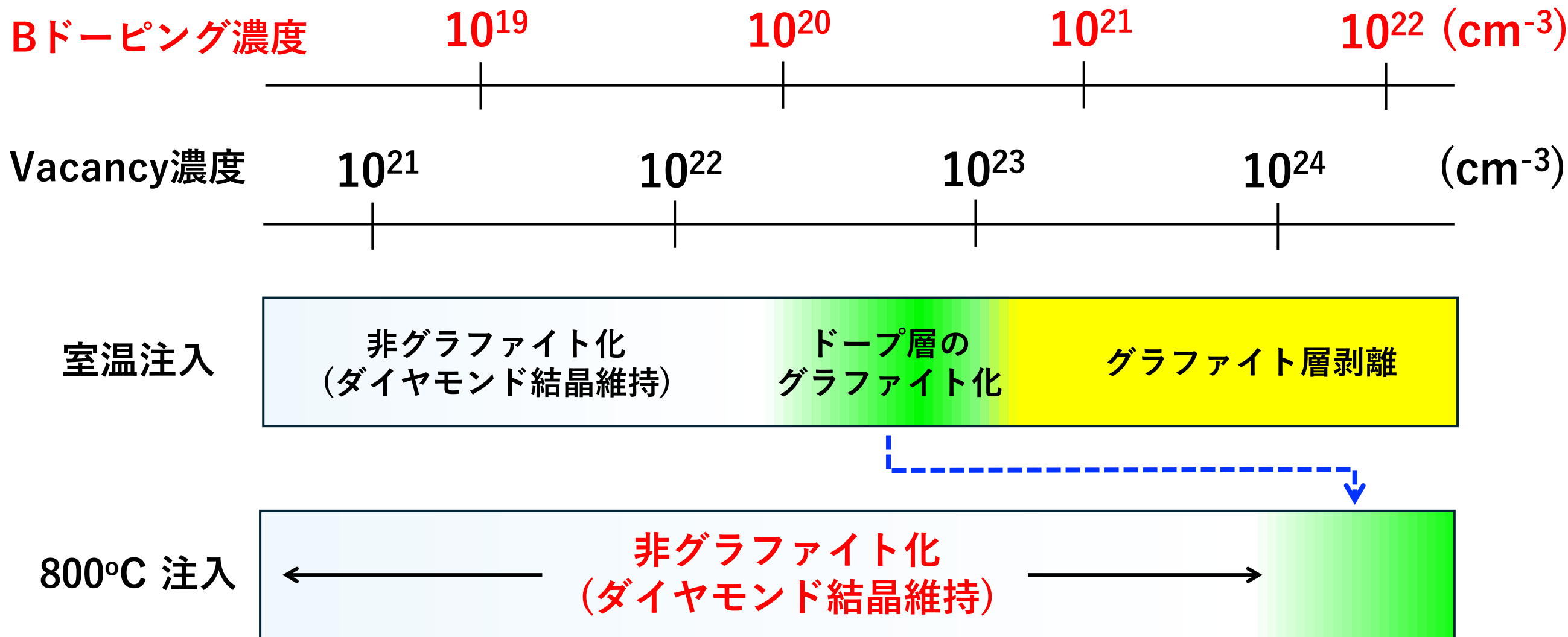
新技術の特徴・従来技術との比較

—まとめ—

- ✓ 従来からのダイヤモンドへの不純物導入法である「CVDドーピング」では、局所・高濃度ドーピングに限界があり、デバイス設計の自由度や作製プロセスの煩雑さに課題があった。
 - ✓ 一方、「イオン注入ドーピング」では、高濃度ドーピングにおいて、結晶性の破壊や欠陥の増加という課題があった。
- 
- ✓ 「ホットイオン注入技術」の適用により、ダイヤモンドの結晶性を維持したまま高濃度でホウ素イオンをドーピングできることが示された。これにより、様々な集積回路への応用や時間的および金銭的なコストの削減につながる。

新技術の特徴・従来技術との比較

— ホットイオン注入効果 —



イオン注入・照射技術が想定される用途

応用が想定される分野	イオン注入のメリット・必要性
高耐圧・高電力デバイス	<p><u>局所不純物ドーピング</u> ソース或いはドレイン領域に精密に導入でき、デバイス設計自由度が高まる</p> <p><u>高濃度ドーピング</u> キャリア濃度を高くできることで抵抗を下げ、伝導効率改善</p> <p><u>量産プロセス</u> 既存半導体製造過程(SiやSiCなど)に組み込まれた標準技術</p>
極限・過酷環境デバイス	<p><u>信頼性設計</u> 注入により濃度分布や深さを精密に制御できるため、高電界耐性を担保する設計</p> <p><u>補償ドーピング</u> 放射線損傷や欠陥を導入したのち、注入+アニーリングで補正できる可能性</p>
量子センシング	<p><u>位置制御</u> 単一イオン注入技術により、NVセンターをナノメートルスケールで配置可能</p> <p><u>制御濃度</u> 注入量・深さ・エネルギーを制御することで必要な領域に密度を制御して導入可能</p>
量子メモリー・発光センサー	<p><u>電気導入型センター</u> NVやSiVセンターへのPなどのドーパント注入による高効率発光デバイス応用</p> <p><u>不純物共存制御</u> 共ドーピングによる発光効率制御</p>

実用化に向けた課題

課題	内容
格子損傷	高濃度注入時に結晶に ダメージが生じる (点欠陥, 空孔, 転移等) → アニール処理によって低減可能だが, 完全ではない (移動度・抵抗に影響が出る可能性あり)
高温アニーリング	効率よく不純物の活性化および結晶欠陥回復をするには, 1300°C以上の 超高温アニール が必須 → 後プロセスへの制限, 高温プロセスによる信頼性の低下(拡散, 構造変化)
不純物の置換率・活性化効率	注入された不純物の 置換率・活性化効率がやや低い ← 欠陥の影響? (Bドーピングにおいては, CVDドーピングの方が電気特性はやや良好) n型ドーピング が実現できていない(CVDドーピングでは特殊な状況では実現)
濃度勾配/遷移層	注入濃度分布勾配 や注入部と未注入部の 遷移層が不均一 になる → デメリットになるか, メリットになるか?
製造コスト	高エネルギーイオン注入装置, 超高温アニール装置など 高価な機器と技術的ノウハウ が必要 ・実用化に向けたR&Dの障壁 ・実用化, 量産においてペイするか

社会実装への取り組み道筋

時期	取り組むべき課題や明らかにしたい原理等	社会実装への取り組み
現在	<ul style="list-style-type: none">✓ イオン注入p型ドーピングが実現(例:局所ドーピング)✓ 浅い準位を持つ不純物の探求✓ 大面積ウエハー	
5年後	<ul style="list-style-type: none">✓ イオン注入n型層形成技術の進展✓ 局所p/n領域形成技術の進展	例:大口径ウエハー供給開始
10年後	<ul style="list-style-type: none">✓ 耐放射線, 高温・高耐压特性を生かしたダイヤモンドデバイス研究が加速	例:SBD, FET等一部実用化
20年以降	<ul style="list-style-type: none">✓ ダイヤモンドの超高耐压性能を用いた高機能デバイスモジュールが商品化✓ ダイヤモンド耐压・信頼性を活かしてHVインフラに採用	例:高級車・特殊産業・極限環境, 量子デバイス向け

2040年頃から, パワーと量子でダイヤモンドが台頭

企業への期待

- **イオンビーム注入・照射技術**による**ダイヤモンド材料の高機能化**を目指した新しいプロセスの共同開発できる企業を希望
- ダイヤモンドに限らず、**ワイドギャップ半導体**の実用化(省エネルギー・パワーデバイス, 量子デバイス等)に向け、**デバイス開発力**のある企業との共同研究を希望
- 上記半導体のイオン注入ドーピングに限らず、イオンビーム照射全般を用いた**新しい材料開発**に関する共同・受託研究を希望
(未知の分野の開拓)

ワイドギャップ半導体の期待される応用分野

自動車・モビリティ分野

- ✓ EV用インバーター
- ✓ DC-DCコンバーター
- ✓ 急速充電器
- ✓ レーダー(車載・ミリ波)

高周波通信・無線技術

- ✓ 5G/6G基地局パワーアンプ
- ✓ 衛星通信, 宇宙用通信機器
- ✓ レーダーシステム
- ✓ WiFi7/8用高効率RFパワーアンプ

光デバイス・センシング

- ✓ 深紫外LED
- ✓ ブルー・紫外レーザー
- ✓ 各種センサー(ガス, 放射線等)
- ✓ バイオセンシング

パワーエレクトロニクス

- ✓ 高効率インバーター
- ✓ 無停電電源装置
- ✓ モーター制御
- ✓ 大規模電力装置(HVDC, FACTS)

宇宙・防衛

- ✓ 耐放射線パワーデバイス
- ✓ 衛星の電源・通信アンプ
- ✓ 高出力レーダーシステム
- ✓ 兵器・誘導装置の高信頼電源

極限環境向け応用

- ✓ 高温センサー電子装置
- ✓ 原子力プラント電子センサー機器
- ✓ 火山観測装置
- ✓ 衛星機器

再生可能エネルギー

- ✓ パワーコンティンション(太陽光発電)
- ✓ 蓄電池システム
- ✓ 水素製造装置用電源
- ✓ スマート家電・HEMS用高効率電源

産業機器・インフラ

- ✓ 鉄道電力変換装置
- ✓ データセンター高効率電源
- ✓ 産業用ロボットモータードライブ
- ✓ スマートインフラ用センサー/電源

量子デバイス・量子センシング

- ✓ 高感度磁気・温度・電場センサー
- ✓ 単一光子エミッター
- ✓ 量子メモリー
- ✓ 量子コンピュータ

企業への貢献、PRポイント

加速器を用いたイオンビーム照射・分析の支援

主にイオンビームを用いた**材料照射・加工・分析等**を通じて、次世代材料の物性制御と定量的評価を実現する一貫した評価・プロセス支援体制を構築。小回りのきく支援。

企業連携における技術運用の流れ

1. 照射目的に応じた条件設計・ビームパラメータ提案
(例:ドーピング/NV形成/非晶質化・結晶化など)
2. 試作レベルの少量照射・評価
(必要に応じて、シミュレーションなども併用)
3. イオンビーム分析(RBS/ERD等)による照射後結晶評価
フィードバック
(必要に応じて、シミュレーションなども併用)
4. 次段階の応用展開に向けた共同検討
(スケールアップ、企業プロセスへの接続等)

 「まずは試したい・確かめたい」を技術的に支援できる環境と知見を提供

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ダイヤモンド半導体の製造方法
- 出願番号 : 特願2025-098411
- 出願人 : 神奈川大学
- 発明者 : 星野 靖, 関 裕平

お問い合わせ先

神奈川大学 研究推進部 産学官連携課

T E L 045 - 481 - 5661

e-mail sankangaku-renkei@kanagawa-u.ac.jp