

電子デバイス基板と ダイヤモンド放熱基板の 大気中・低温での直接接合

産業技術総合研究所 エレクトロニクス・製造領域
デバイス技術研究部門 集積化MEMS研究グループ
研究員 松前 貴司

2021年9月9日

本技術について

- 直接接合(⇔間接接合:接着剤やはんだによる接合)

熱圧着: 融点・軟化点付近で貼り合わせ

- 熱膨張係数の異なる材料の接合 ×

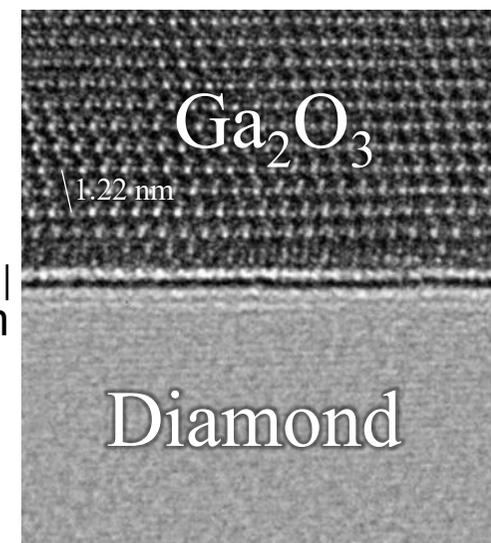
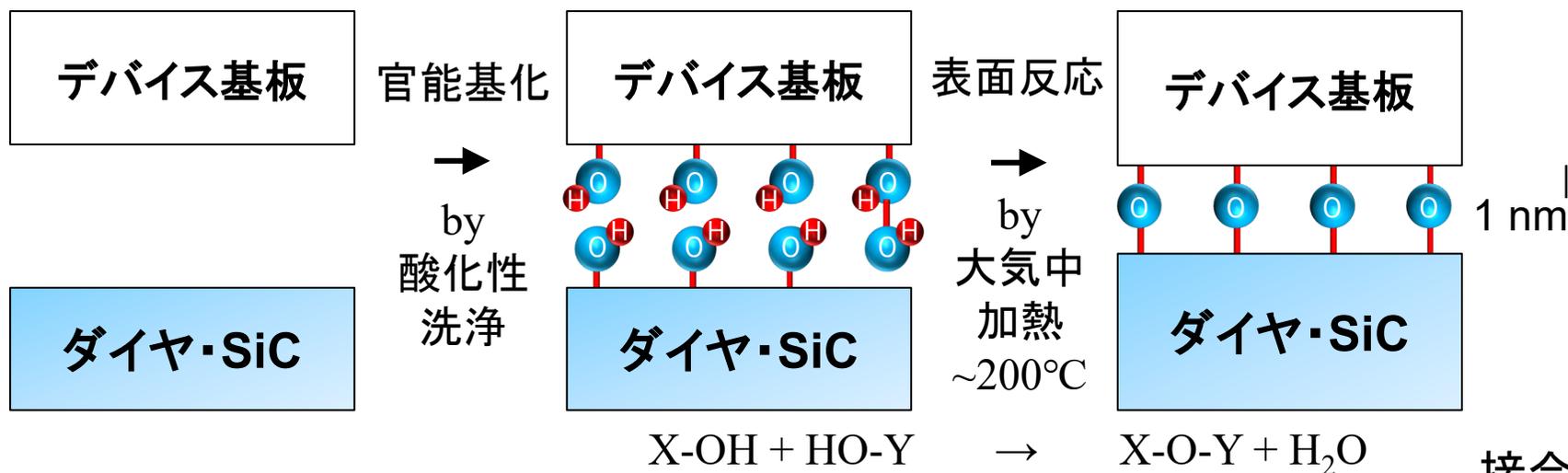
今回はこちらを開発

低温接合: 室温~200°C程度で接合 ◀

- 熱膨張係数の異なる材料の接合 ○

本技術について

- 今回開発した接合プロセス
半導体デバイスとダイヤモンド・SiCといった高放熱材料を、
実施容易な**大気中工程**でかつ**基板間の障壁層を極薄**に抑えながら接合する手法を開発。



接合界面のナノレベル観察

半導体デバイスと高放熱材料の直接接合

デバイスの

高出力化
高周波数化
高輝度化

微細化
高密度集積化
3次元実装化



パワー密度(W/m²)の急増
指数関数的^{moore}とも

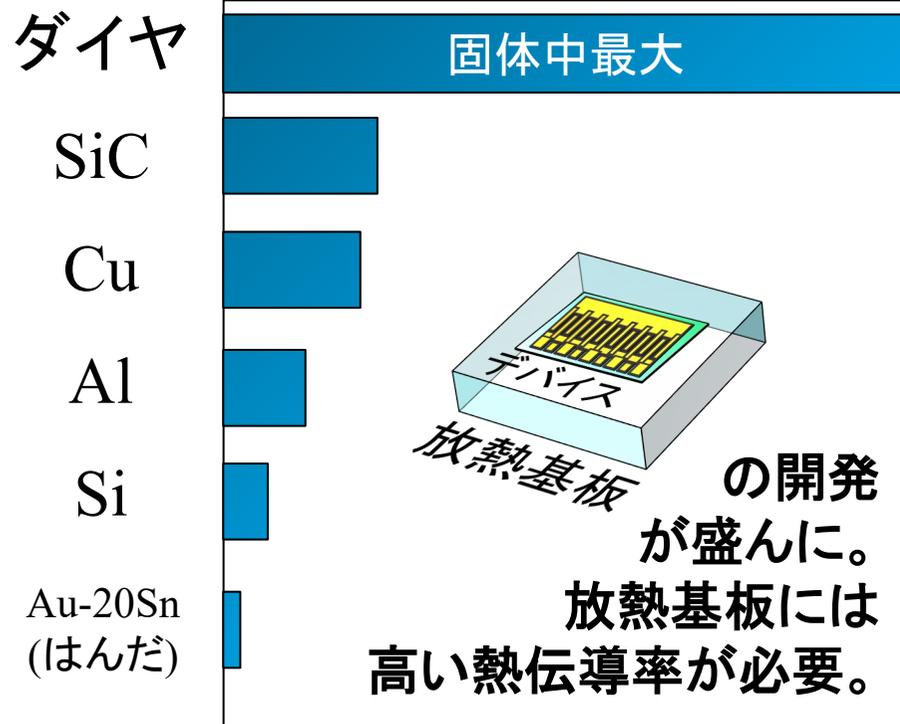


半導体デバイスは高温下で特性・寿命劣化
⇒効率的な放熱構造の開発が活発に

- デバイスを高い熱伝導率をもつダイヤモンド、炭化ケイ素(Silicon Carbide: SiC)の活用が検討

熱伝導率 (W/m/K)

0 1000 2000



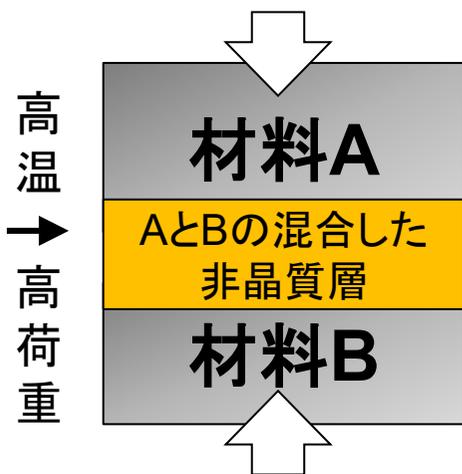
半導体デバイスと高放熱材料を

伝熱阻害する**中間層なくかつ簡易な工程**で貼り合わせる技術が必要

既存の直接接合手法(真空接合)

- 熱圧着

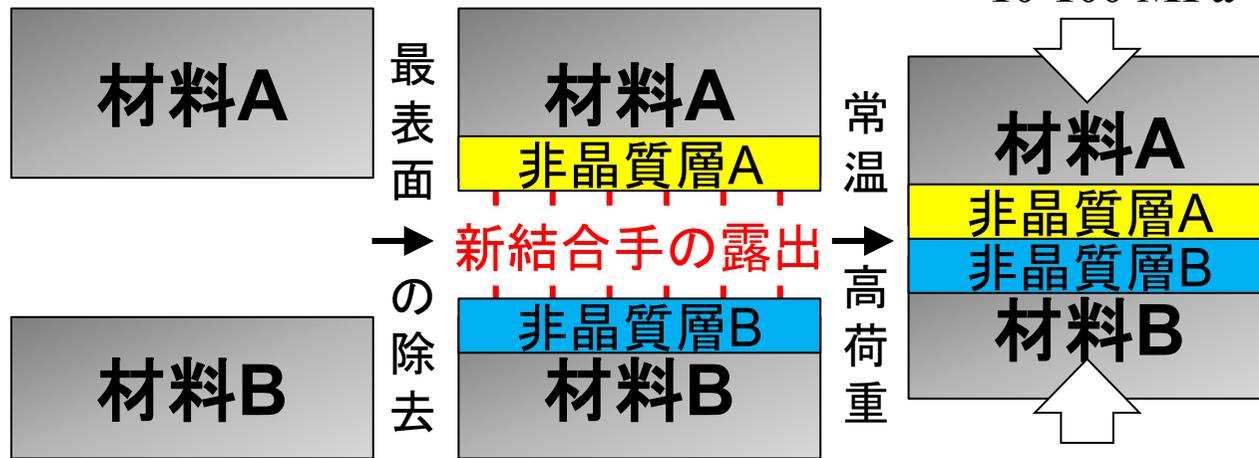
ダイヤモンド >1150°C
SiC >1000 °C
~50 MPa



熱歪みで基板割れ

- 表面活性化接合

須賀・重川ら 
ダイヤモンド・SiCともに
常温で接合可能
~10-100 MPa



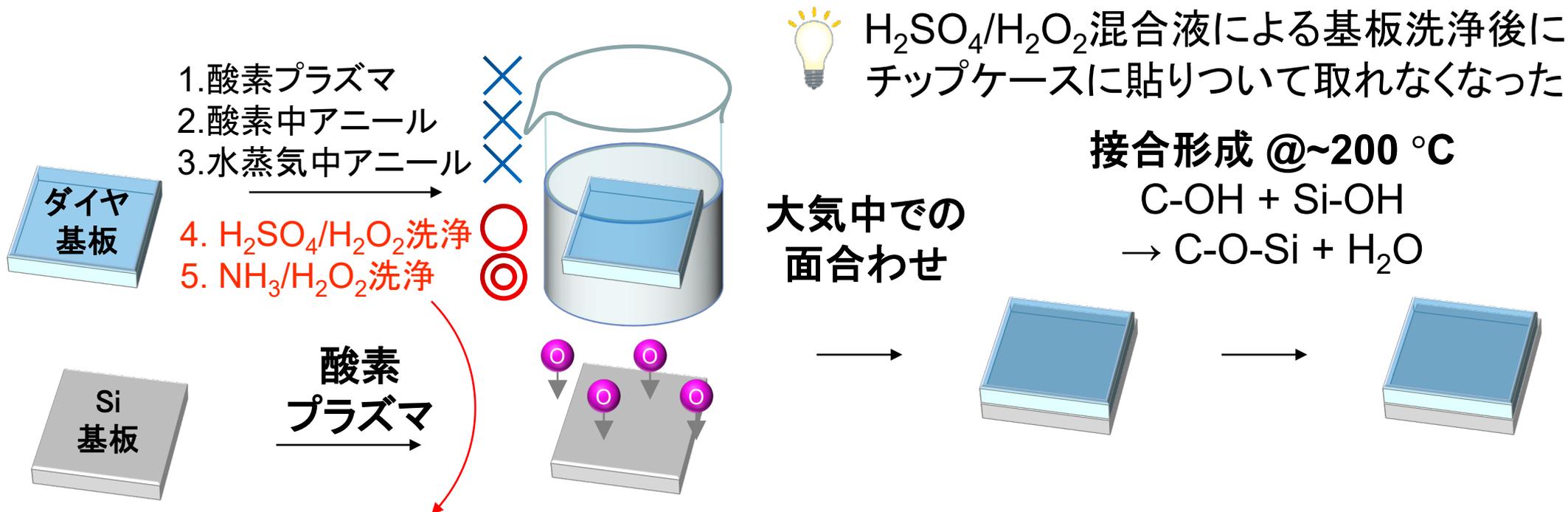
異種基板でも常温で接合可能

超高真空中で前処理・加圧のできる**専用装置が必要**

ダイヤモンド基板の接合プロセス開発

大気中接合のための適切な接合前処理が不明だった

1. 効果的なOH終端化 2. 表面平坦性の維持 3. 低汚染



一般的な半導体基板の洗浄プロセス

H_2SO_4/H_2O_2 混合液: ピラニア洗浄液、レジスト残差除去に効果

NH_3/H_2O_2 混合液: SC1洗浄液、パーティクル除去に効果、RCA洗浄

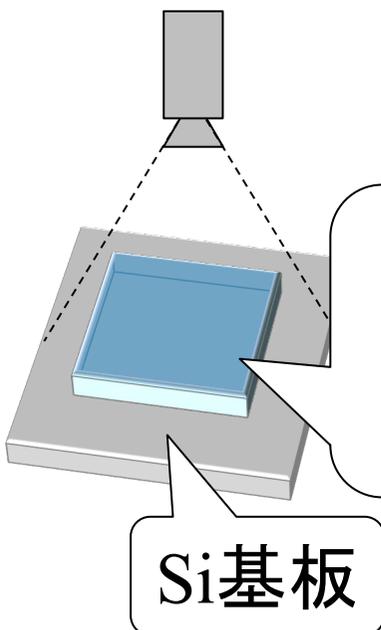
ダイヤモンド基板/Si基板接合体

[松前, 2019]

(a) 非適切条件

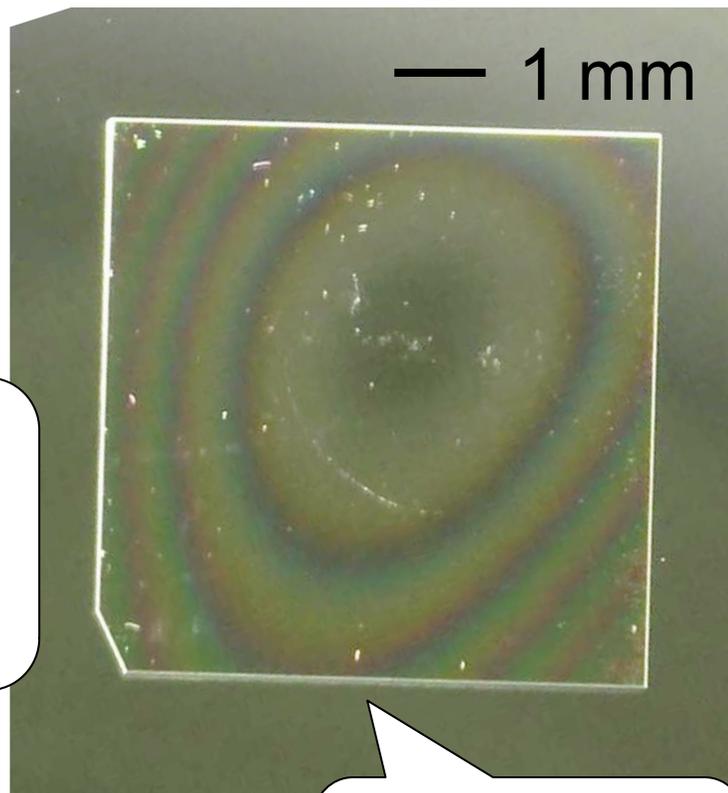
(b) 適切条件

接合された
ダイヤモンド基板を観察

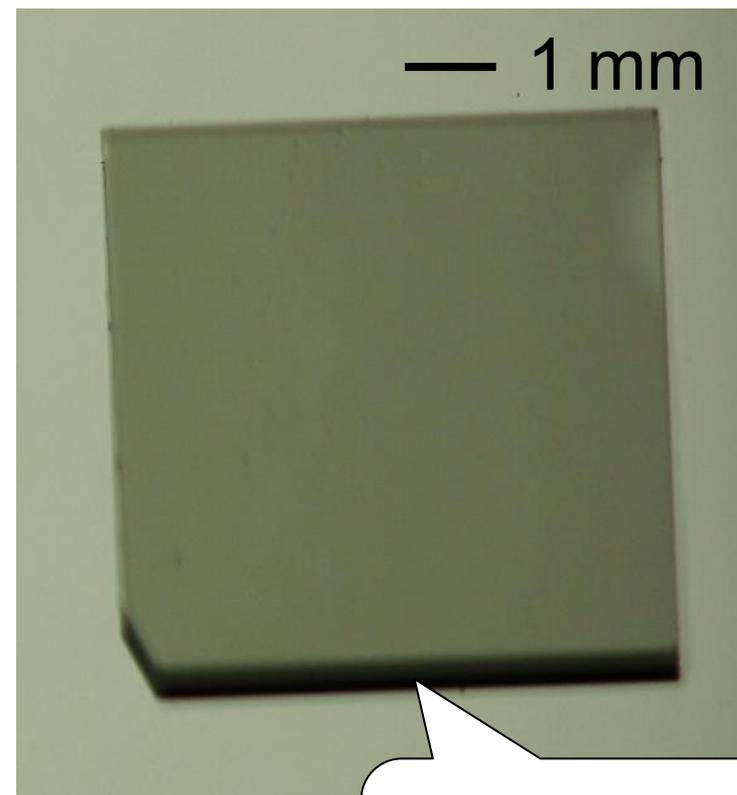


ダイヤ
基板
(透明)

Si基板



非接合部にて
ニュートンリング
を観察

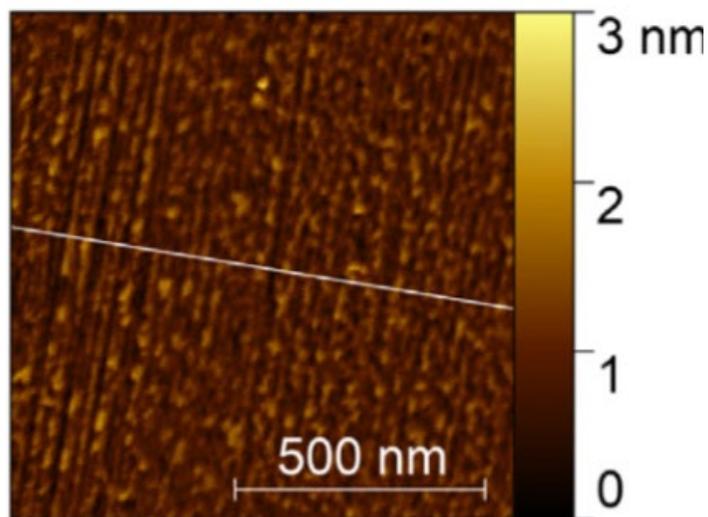


ほぼ全面にて
直接接合

ダイヤモンド表面形状：原子間力顕微鏡

良好な接合には平均二乗高さ
(RMS, Sq) < 0.5 nm程度の
平滑面が必要

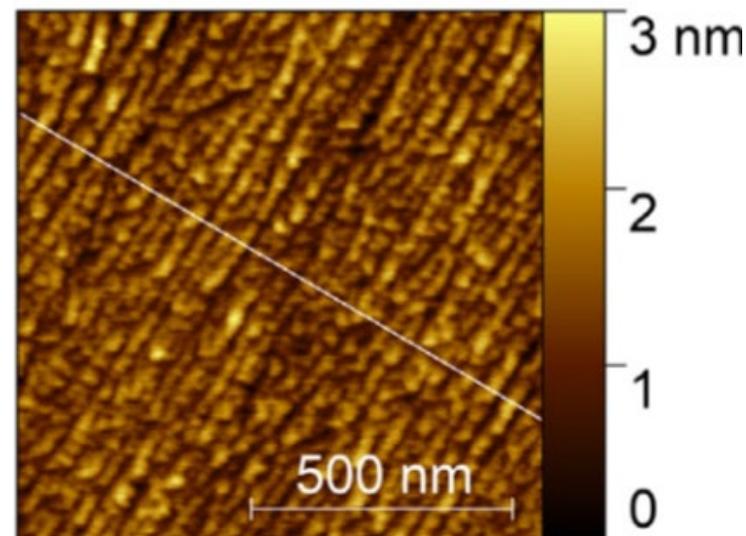
処理前



RMS: 0.3 nm

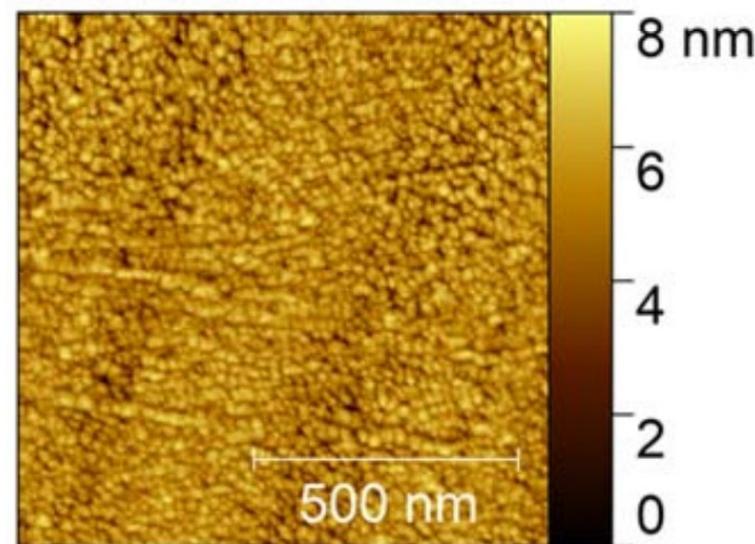
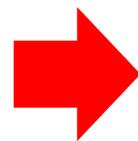
[松前, 2019]

$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$
処理 @ 75°C



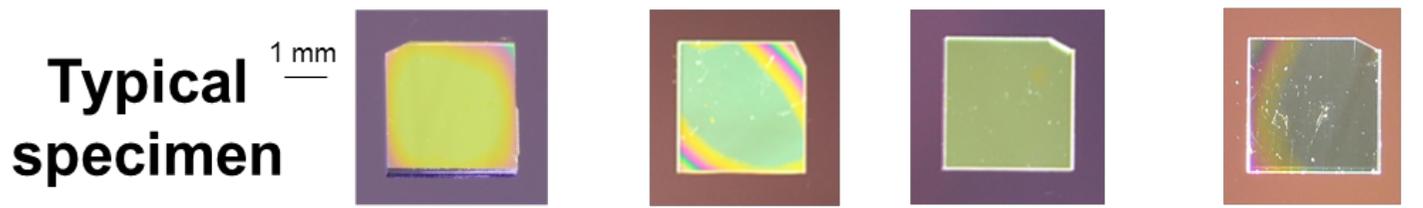
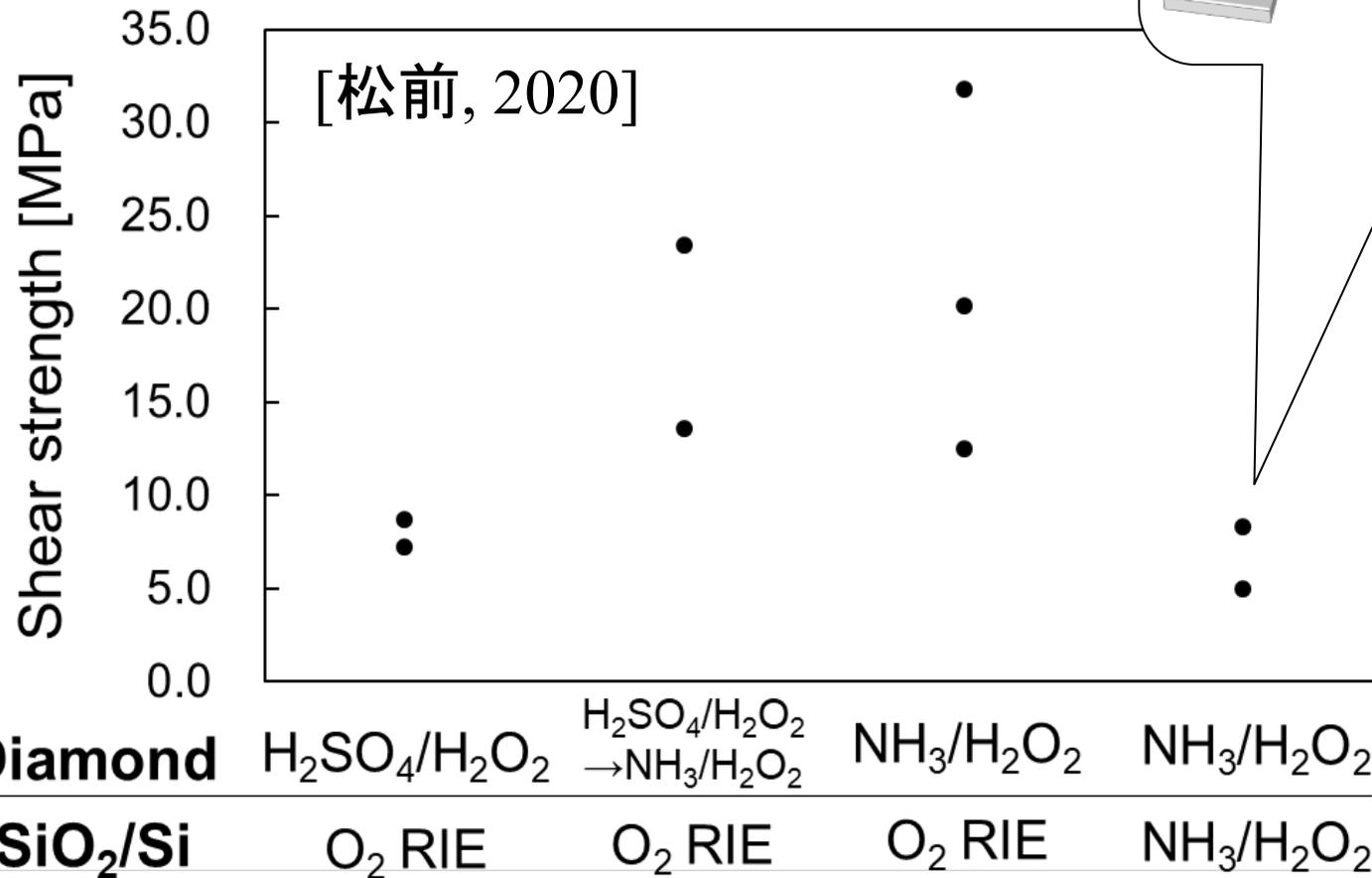
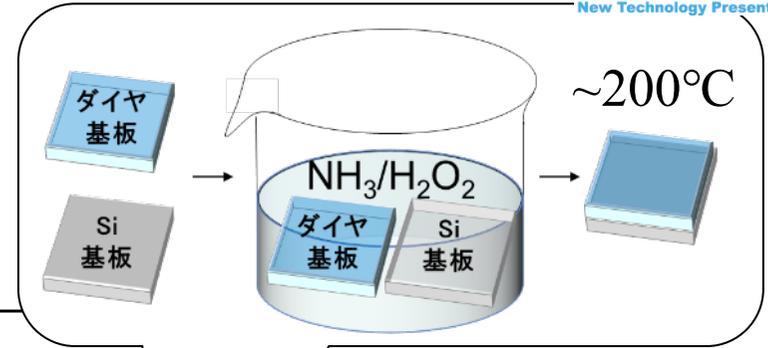
RMS: 0.4 nm

$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$
処理 @ 110°C



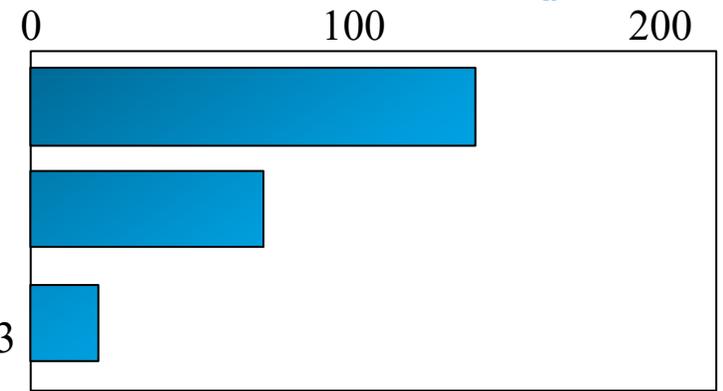
RMS: 0.9 nm

接合強度について



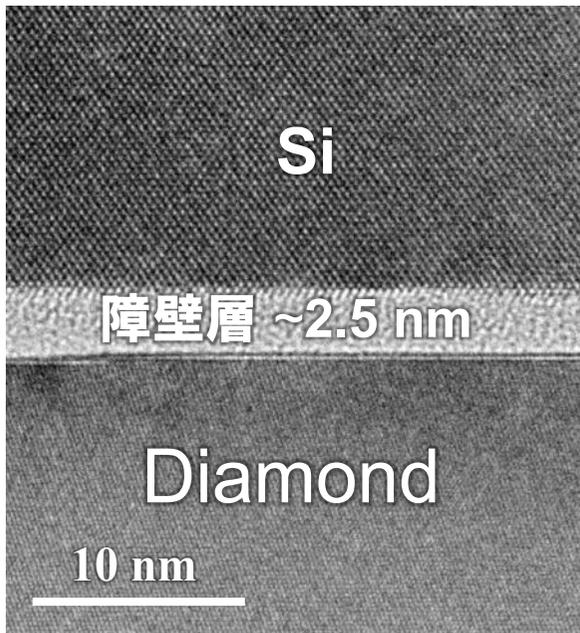
高強度の条件ではダイヤモンド基板が破断

熱伝導率 (W/m/K)

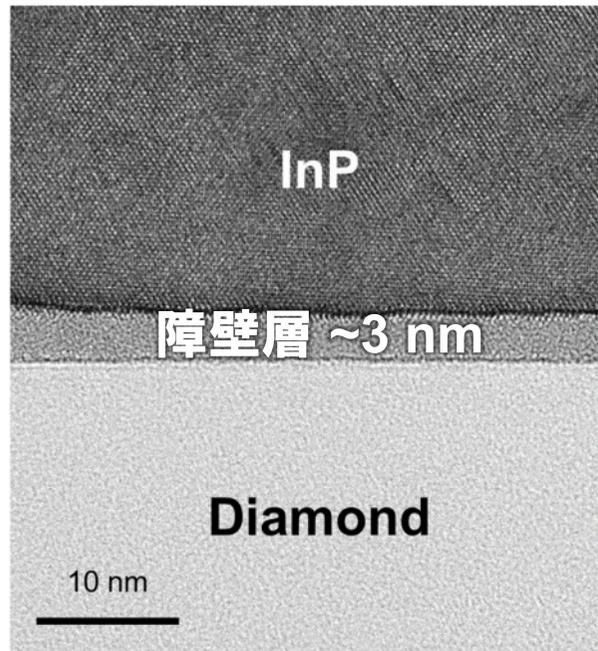


材料展開・ナノ観察

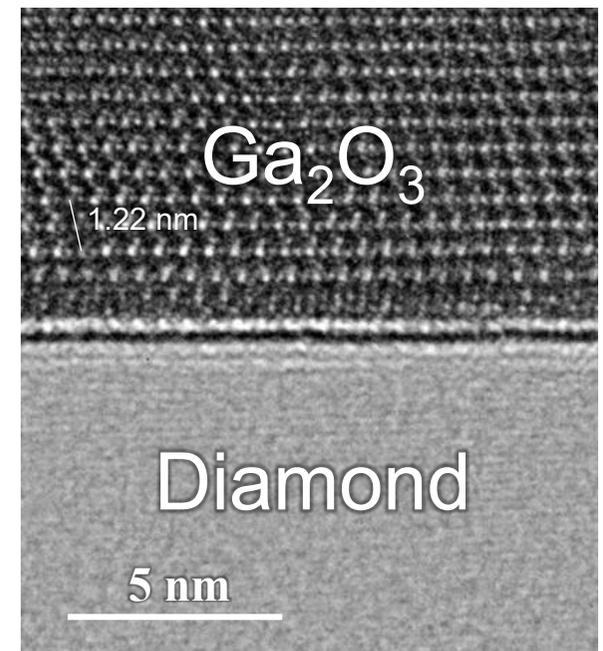
Siだけでなく、InP(高周波素子&光学素子)、Ga₂O₃(次世代パワー半導体素子)にも展開可能。 β -Ga₂O₃



[松前, 2020]



[松前, 2021]



[松前, 2020]

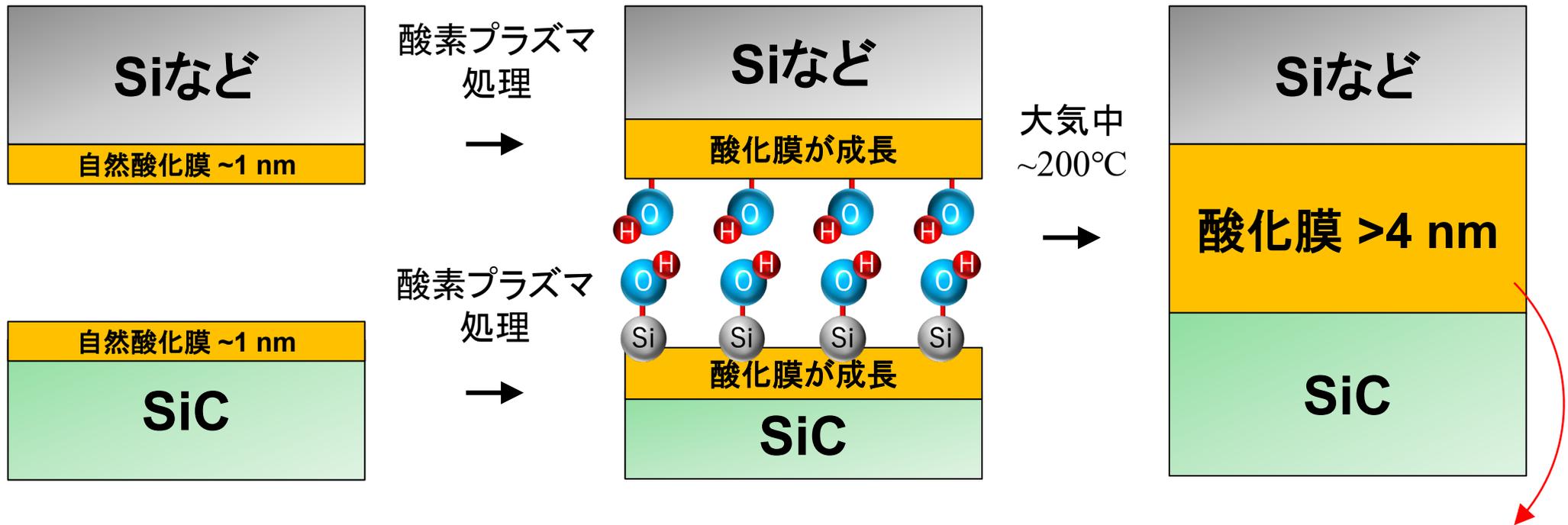
簡便な大気中工程・数ナノの障壁層にてデバイス材料とダイヤモンド基板が接合できた。障壁層は基材の酸化物(例: SiO_x, InP_xO_y)からなる。

一方でGa₂O₃(酸化物)とダイヤモンド(酸化膜のない材料)を中間層ほぼなく接合できた。

究極の放熱構造となる可能性

既存のSiC基板接合プロセス

ハルビン工業大学 Qiushi Kangら, 2020

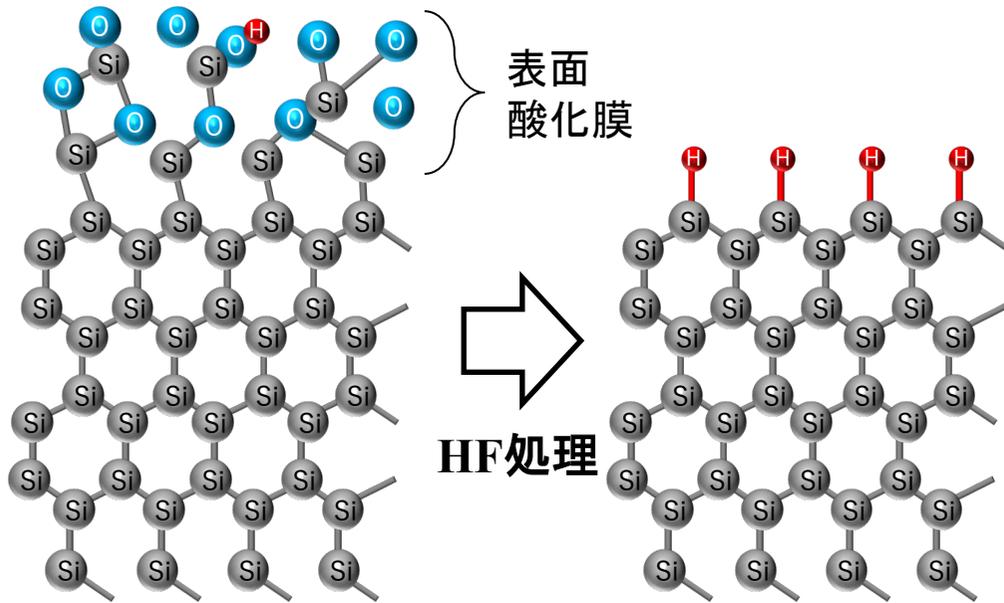


SOI基板製造のように強い酸化処理を用いて接合すると、**接合界面に厚い酸化層(4-9 nm)** ⇒ 効率的な伝熱を阻害。

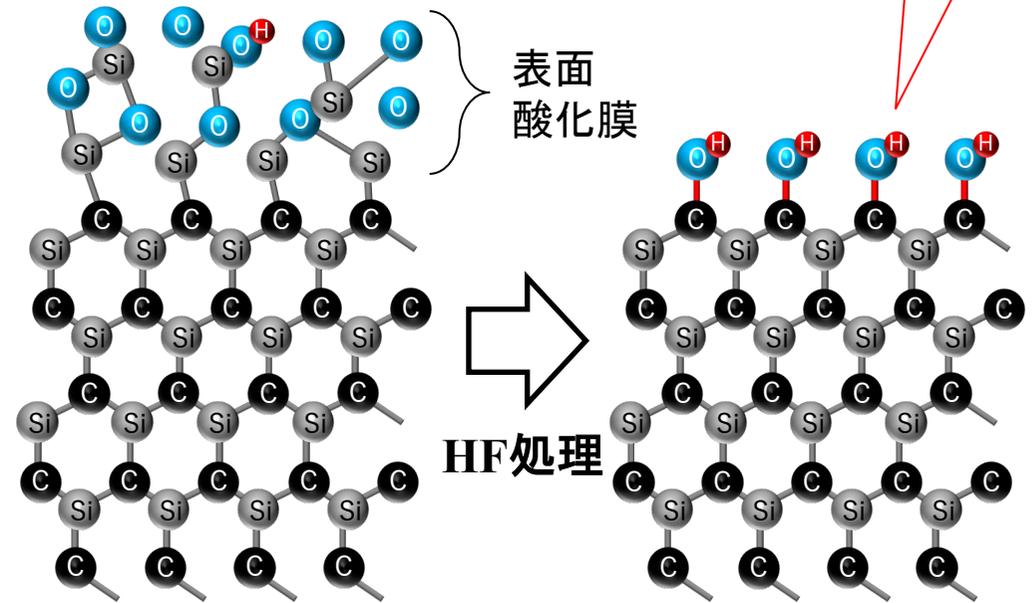
SiC表面処理について

この表面を
接合できないか

Si基板のHF処理→疎水化

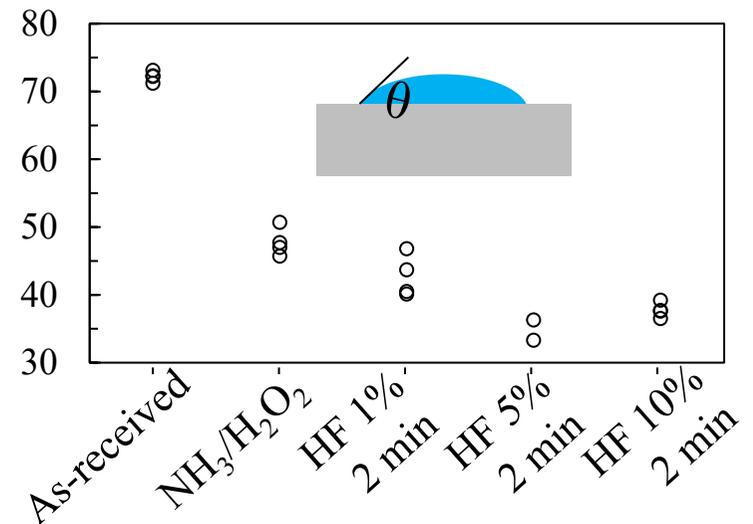


Si基板のHF処理→親水化



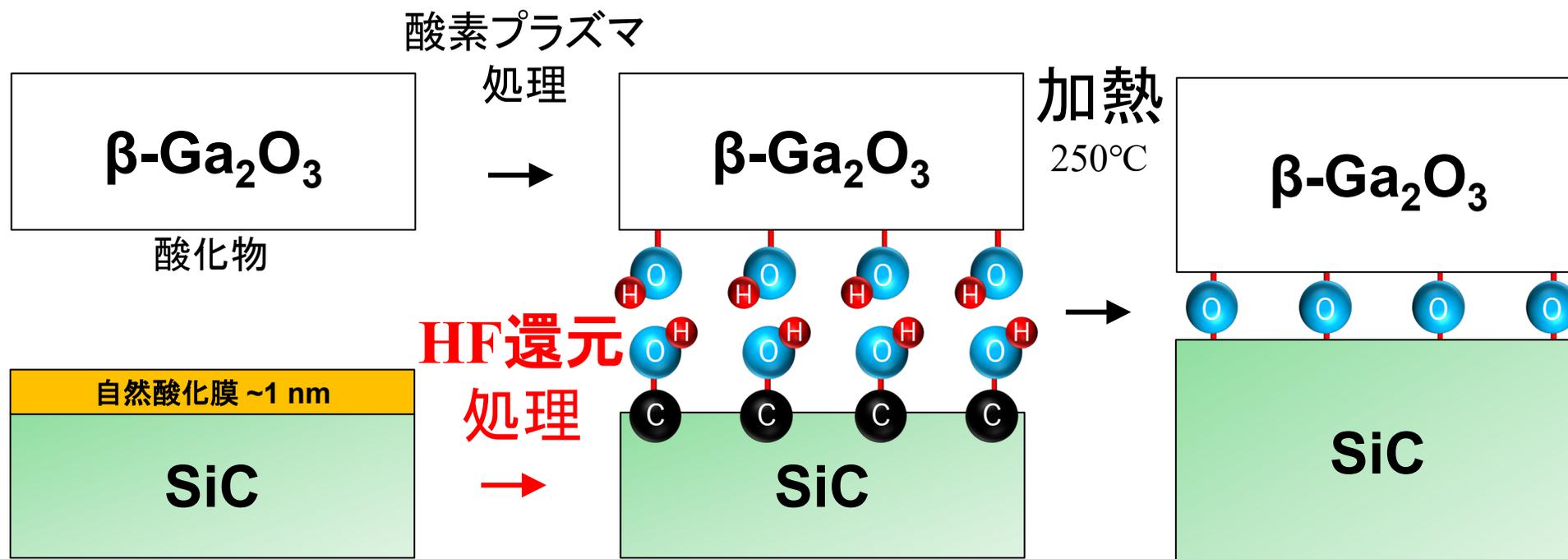
水滴の濡れ角 (°)

低いほど表面が親水性



[松前, 2021]

提案SiC基板接合プロセス



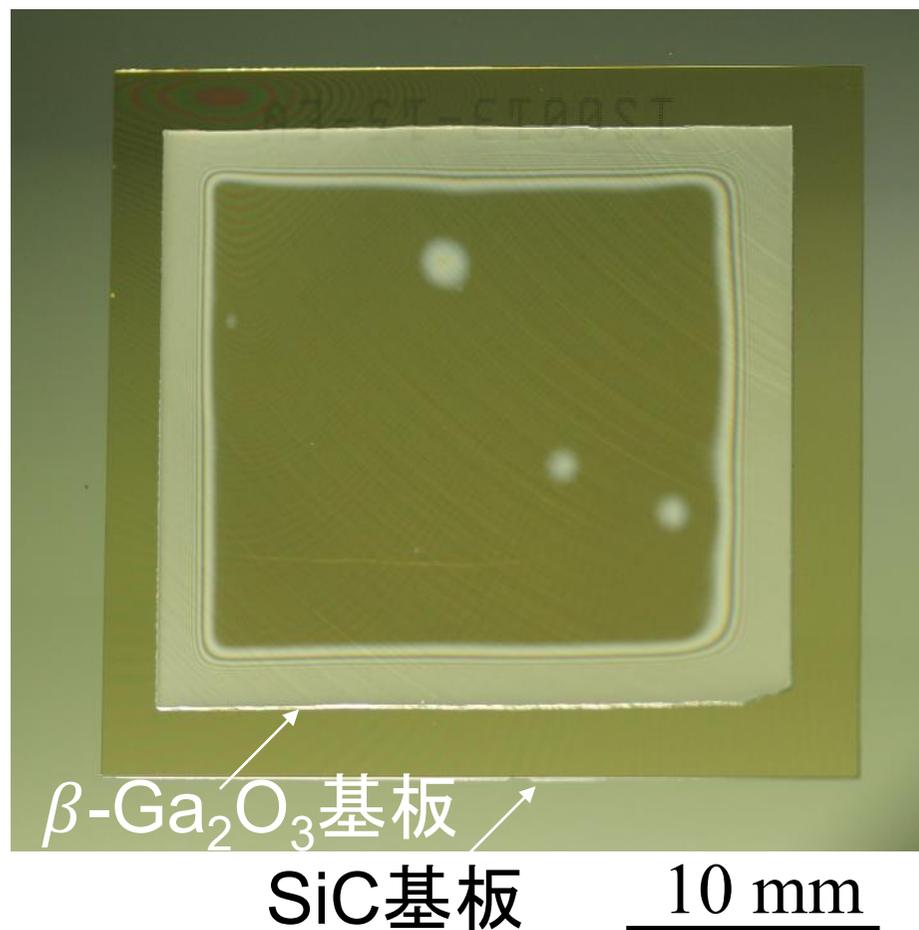
酸化膜を除去しながらOH終端化

還元処理の活用

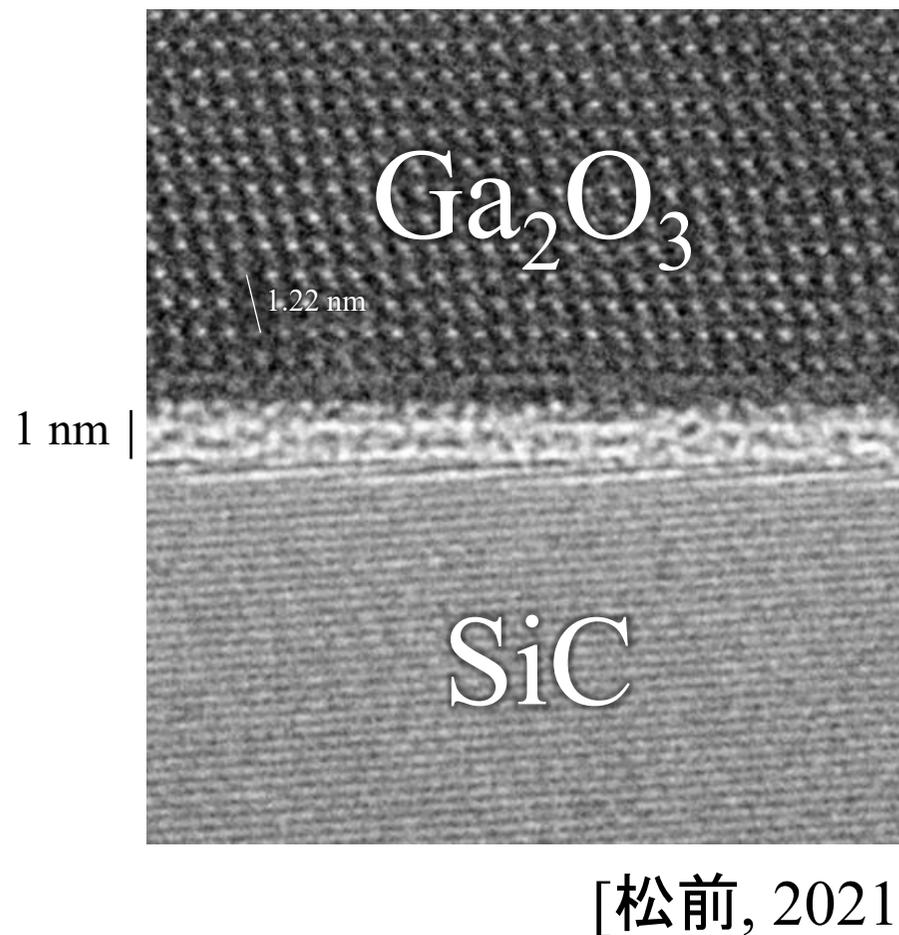
→酸化する材料も極薄の障壁層で接合可能に

Ga_2O_3 基板/SiC基板接合体

接合基板写真



接合界面観察



酸化膜の出来る材料でも障壁層<1 nmで接合可能に

複合化手法の比較

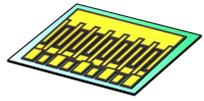
		温度	雰囲気	中間層厚さ	備考
結晶成長	ヘテロ結晶成長	>1000°C	真空	5~50 nmなど	格子定数・熱膨張係数の異なる組み合わせ不可
	はんだ接合	200-400°C	大気中	1,000-10,000nm	厚い導電性中間層の発生
間接接合	ナノペースト	~150°C	大気中	1,000-10,000nm	厚い導電性中間層の発生
	金属接合層の活用	室温~		10-100 nm	接合界面は導電性
	熱圧着	>1000°C	真空	>10 nm	熱伝導率の異なる組み合わせ不可
直接接合	表面活性化接合	常温	超高真空	~4 nm	界面にSiやFe, Crの汚染が挿入、結晶構造の乱れ
	親水化接合 (酸化前処理の活用)	~200°C	大気	*酸化する材料 ~5 nm *酸化物& e.g.)Ga ₂ O ₃ 酸化膜のない材料 < 1 nm Diamond	筆者らがダイヤモンド/Ga ₂ O ₃ 間の障壁層が極薄となることを発見
	還元前処理を用いた親水化接合	~200°C	大気	< 1 nm SiC *酸化する材料も可	筆者らがSiCにおける中間層の薄化を実現

想定される用途

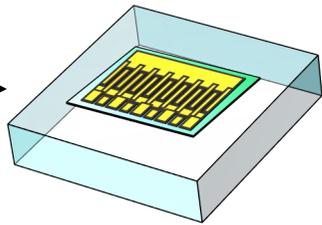
- 本技術を用いてデバイス基板と放熱基板を直接接合することで、簡易な装置・工程で高効率な放熱構造の実現が期待。

例1: チップレベル接合

デバイス



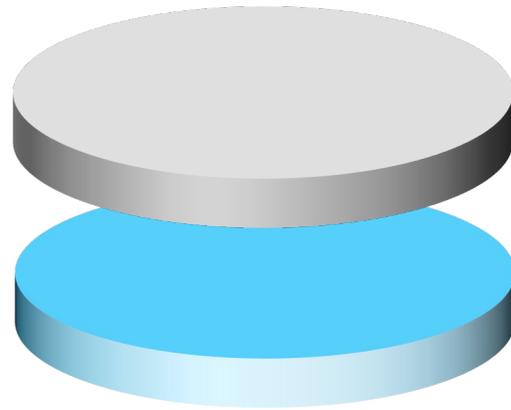
直接
接合



放熱基板

例2: 複合基板のウェハスケール製造

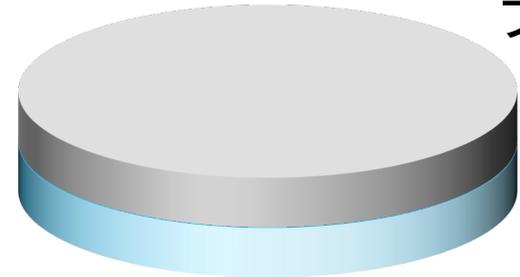
デバイス基板



高熱伝導率基板

直接
接合

高放熱型
複合基板



プロセスへ



実用化に向けた課題

- デバイス放熱性能・材料コストなどを総合的に評価していく必要がある。
- 現状では手作業レベルの接合実験に留まり、ピンセットによる汚染・位置ずれなどに苦しんでいる。

企業への期待

- 産業化を目指し「薬液による表面処理→基板同士の接触→加熱~200°C」が可能な装置を開発していきたい。
- ダイヤモンド・SiCに限らず、極薄の中間層で接合できると面白い材料があれば相談させていただきたい。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ダイヤモンド結晶体を備える複合体
出願番号 : PCT/JP2020/016893
出願人 : 国立研究開発法人産業技術総合研究所
発明者 : 松前 貴司、梅沢 仁、倉島 優一、高木 秀樹

問い合わせ先

産業技術総合研究所
知的財産部 技術移転室

TEL 029-862-6158

FAX 029-862-6159

e-mail aist-tlo-ml@aist.go.jp