

# ダイヤモンドと異種材料の直接接合 による高効率デバイスの実現

大阪市立大学

大学院工学研究科 電子情報系専攻

准教授 梁 剣波



# 半導体素子動作時に大量な熱発生

半導体素子の小型化、高集積化、高性能化、高出力化に伴い、素子内部に発熱量が増加



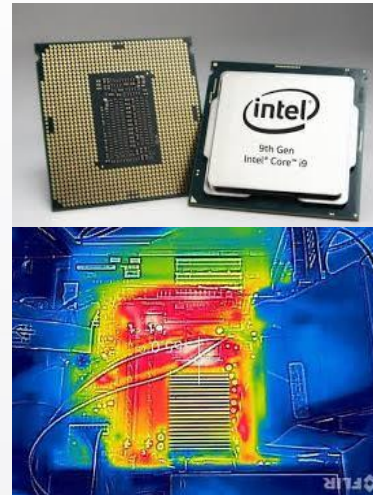
素子温度の上昇による素子の寿命と出力の低減及び故障率の増加



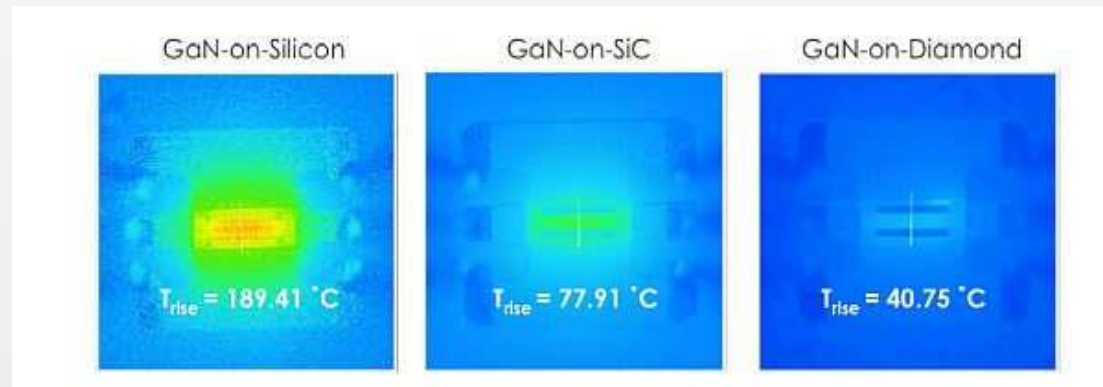
素子温度の上昇を抑制することが重要課題



素子温度の低減が基板の熱伝導率に依存



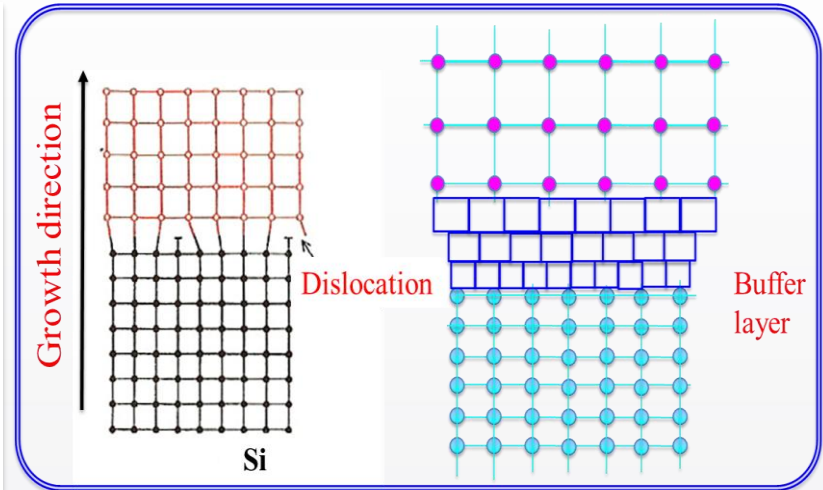
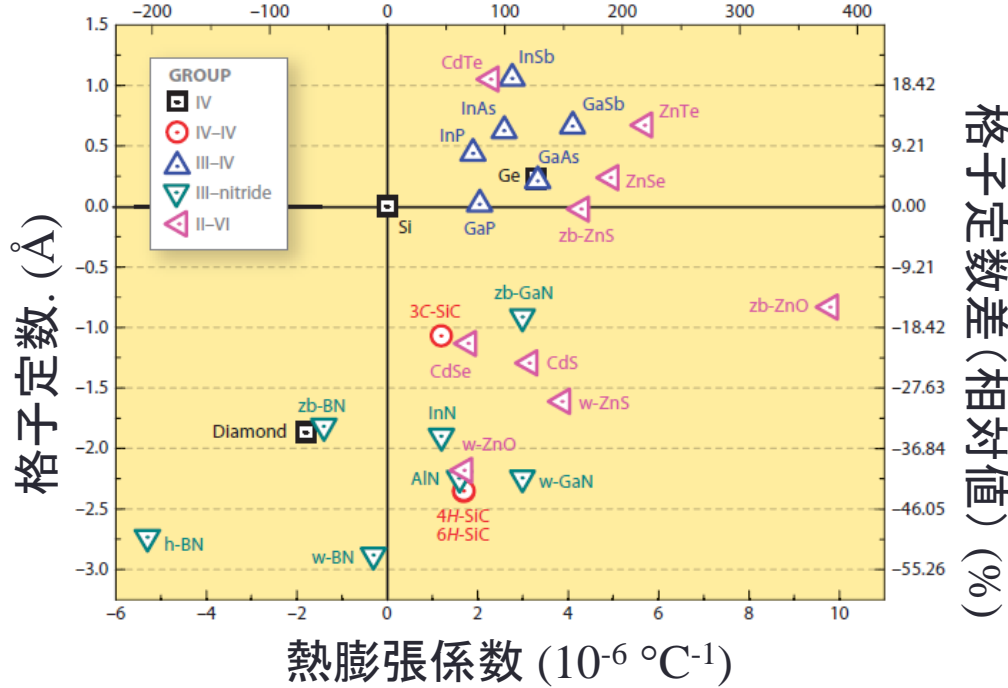
PCのCPU



異なる基板上に作製した素子の表面温度

# 異種半導体接合 — なぜ貼りあわせが必要か？

熱膨張係数差(相対値)(%)



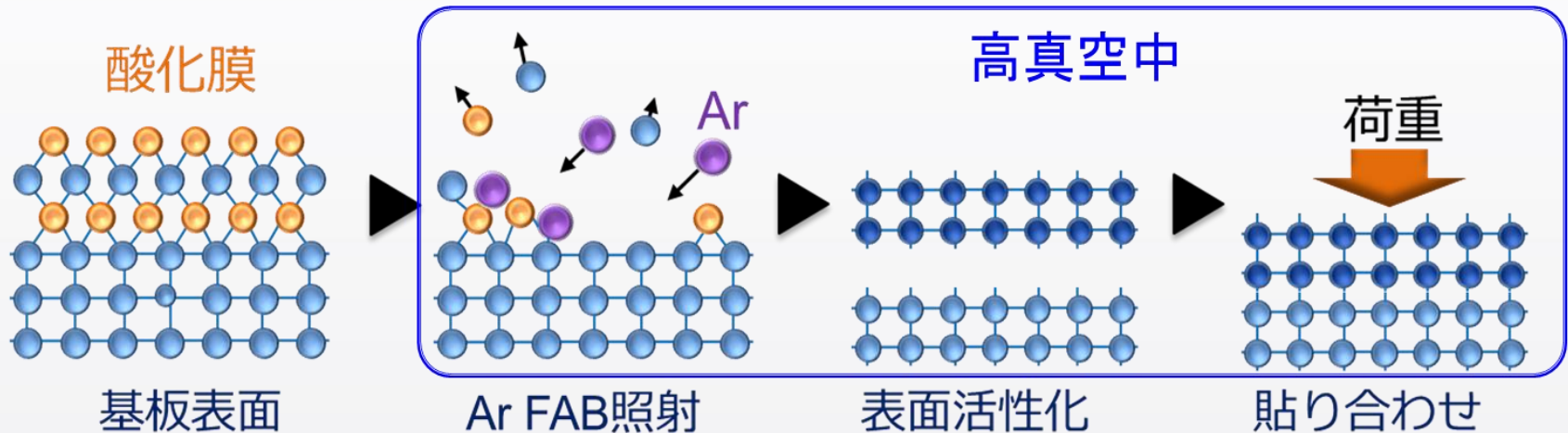
Lattice mismatching

- 異なる材料の積み重ね — 通常は結晶成長
- 緩衝層による結晶成長されるエピタキシャル層に多くの欠陥が発生

Si格子定数:  $5.43102 \text{ \AA}$  熱膨張係数:  $2.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ダイヤモンドと格子定数差は大きい材料の結晶成長が非常に困難

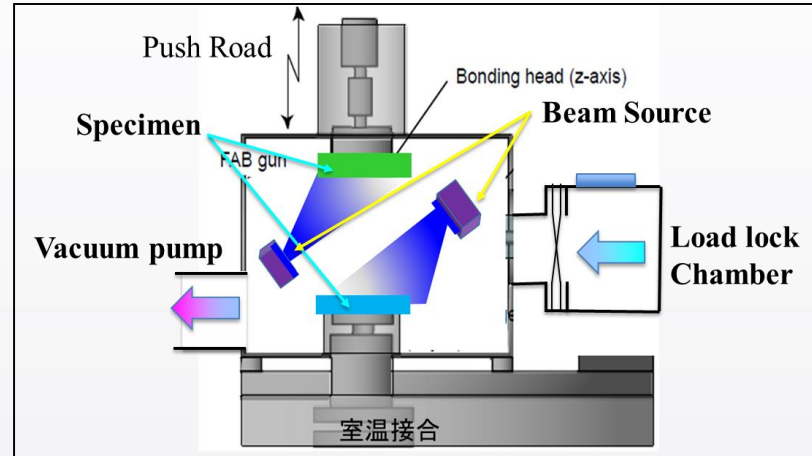
# 接合(貼り合わせ)技術 —表面活性化接合(Surface Activated Bonding)—



- 超高真空中でAr原子ビームを照射。表面の酸化膜を除去(表面活性化)
- 常温で荷重をかけて貼りあわせ。中間層無。

(東大・須賀教授 開発)

## 保有する表面活性化接合装置

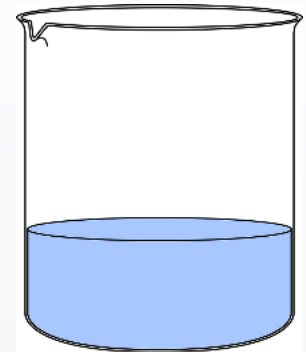
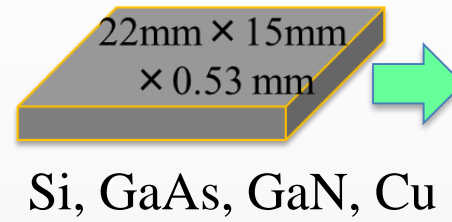
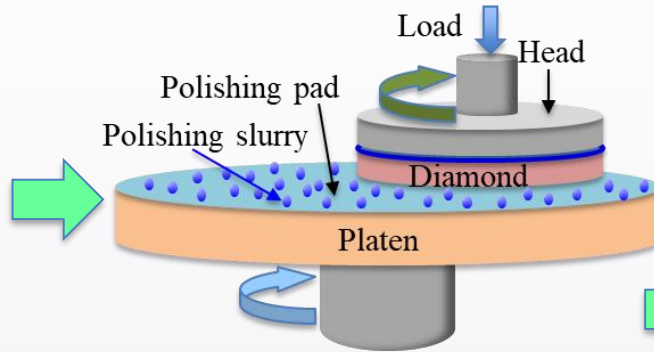
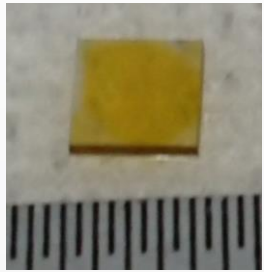


- 接合に要する時間：~30分
- 表面凹凸、清浄度に制限あり。
- 試料サイズ：不定形（最大直径3インチ）

接合実験のお申し出を大歓迎します。



# ダイヤモンドと異種材料接合



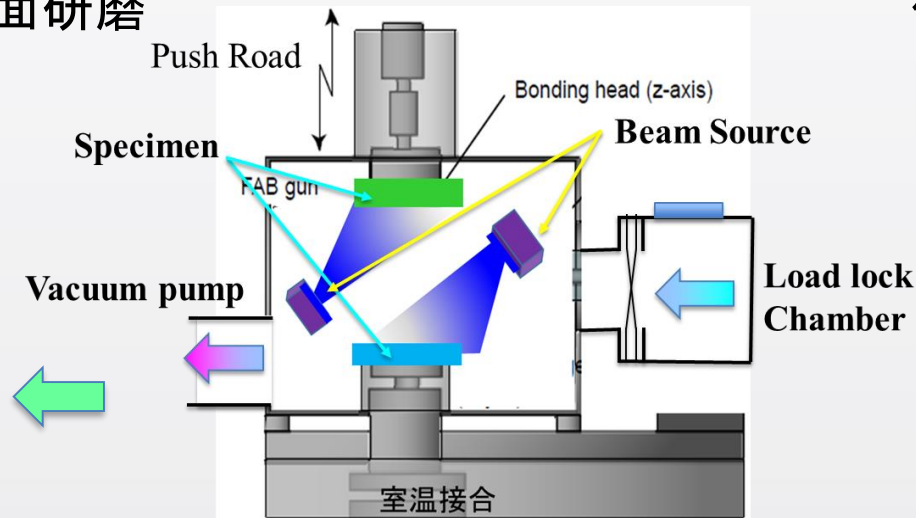
ダイヤモンド基板

鏡面研磨

化学洗浄

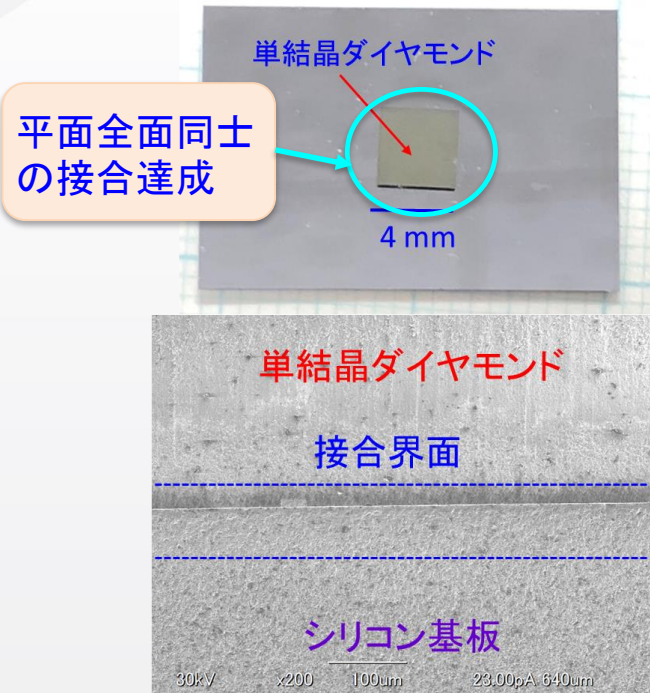


接合完成

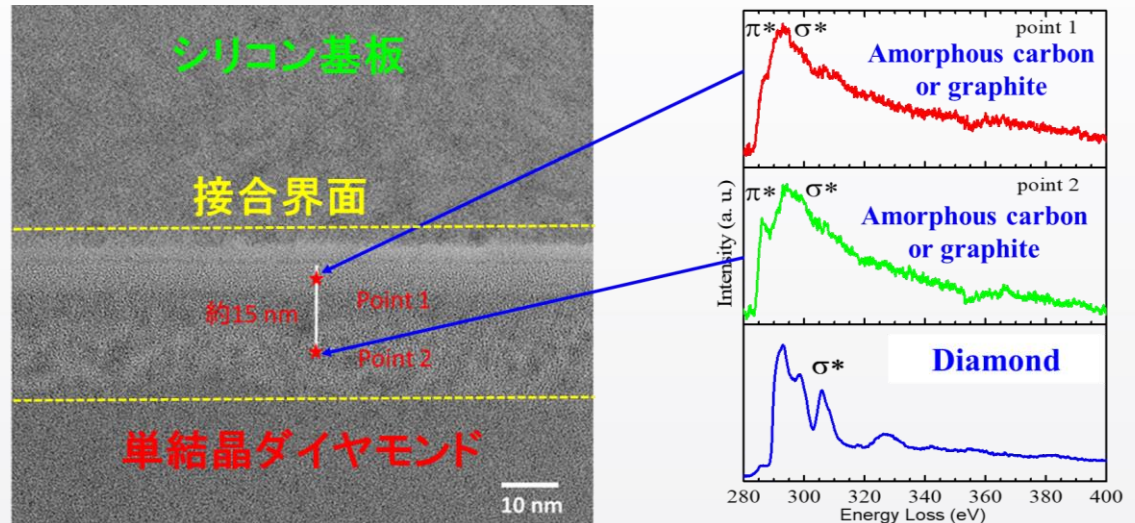


表面活性化接合

# ダイヤモンド/Si接合



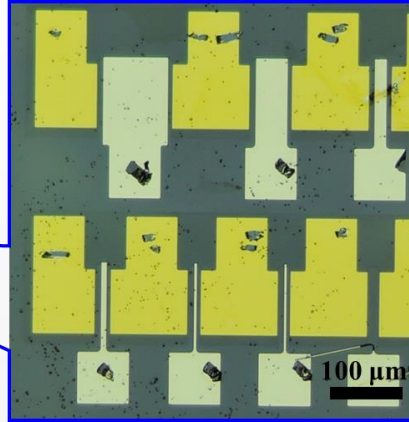
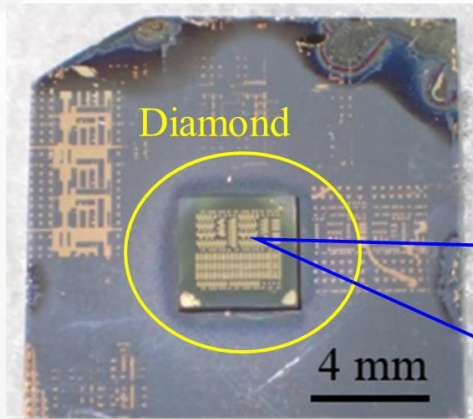
ダイヤモンド単結晶/Si接合試料の全体写真と界面断面SEM像



ダイヤモンド単結晶/Si接合界面断面TEM像及びEELS

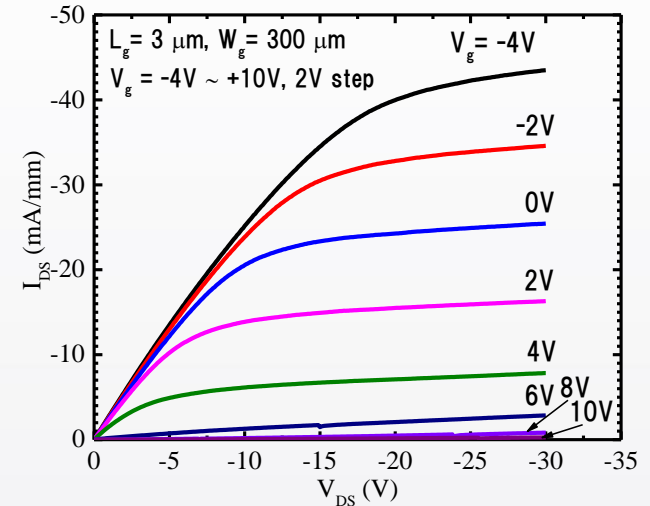
常温でダイヤモンドとSiの直接接合が可能であることを実証した

# ダイヤモンド基板上的デバイス作製実証

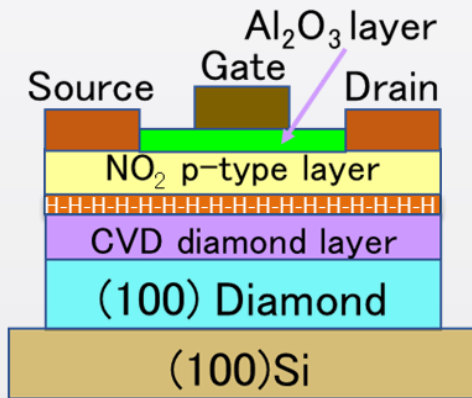


作製した試料の光学顕微鏡像

FETのトップイメージ



Siと接合したダイヤモンド上に作製したFETの  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  特性

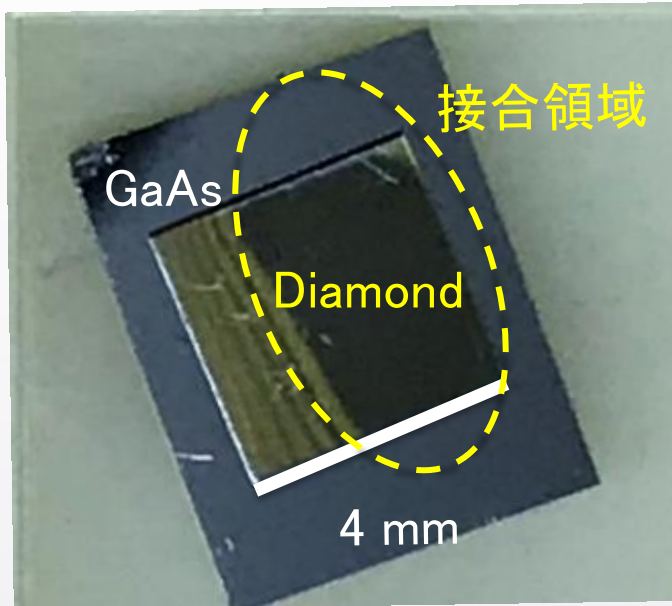


ダイヤモンドMESFET構造

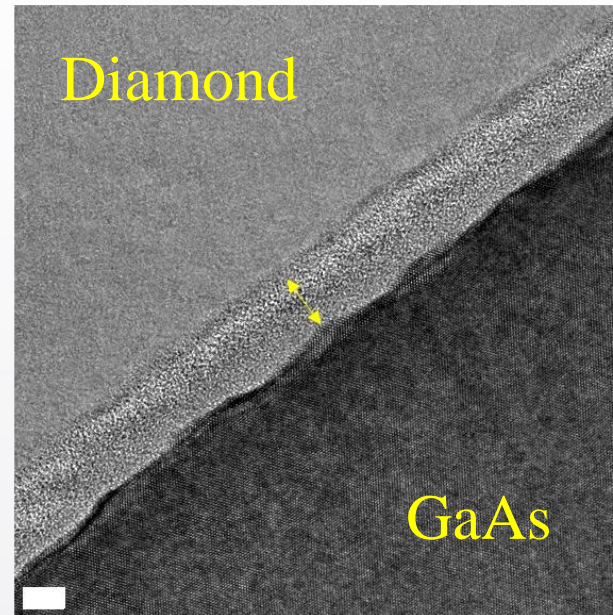
- The FET shows normally-on characteristics.
- The saturation current increases as the  $V_{GS}$  decreases.
- 最大ドレン電流( $I_{DS}$ ): 43.5 mA/mm
- 最大コンダクタンス( $g_m$ ): 4.6 mS/mm



# ダイヤモンド/GaAs直接接合



ダイヤモンド/GaAs接合試料  
表面の光学顕微鏡像

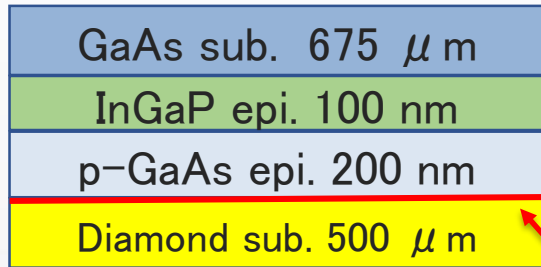


ダイヤモンド/GaAs接合界面  
の断面TEM像

- SAB法により常温でのGaAs/diamondの**直接接合に成功**
- 接合界面にナノレベルの亀裂や空洞が観察されず

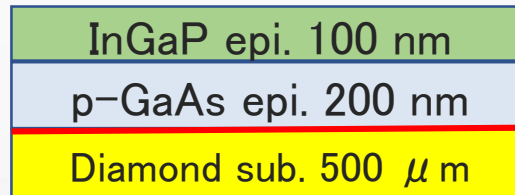
# ダイヤモンド/GaAs直接接合

① GaAs/diamond接合

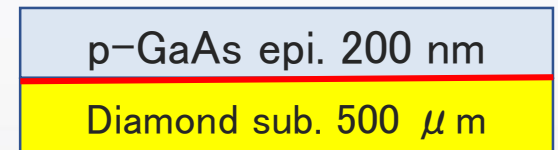


接合界面

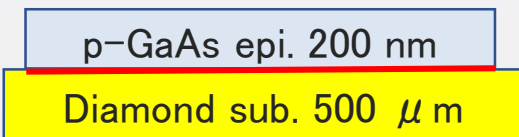
② GaAs基板を  
 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=$   
1:10:100の溶液で除去



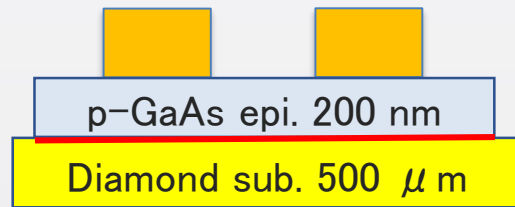
③ InGaPエピ層を  
 $H_3PO_4:HCl:H_2O=$   
1:1:1の溶液で除去



④ メサエッチング

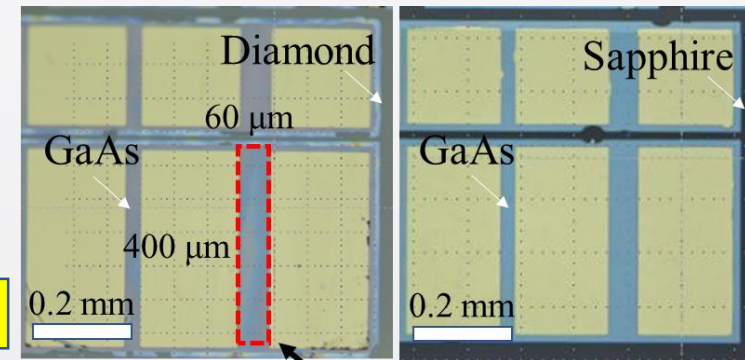


⑤ 電極形成  
(AuZn/Ti/Au)



ダイヤモンド基板

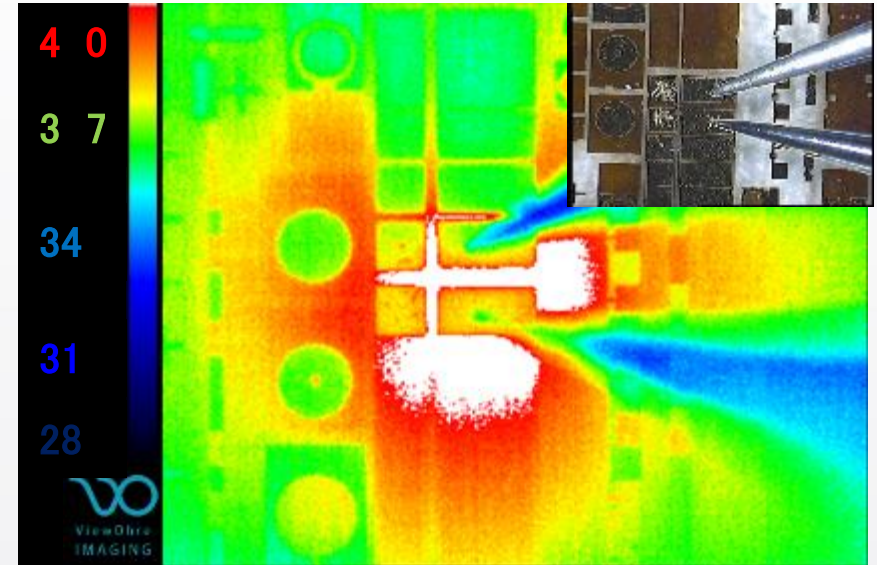
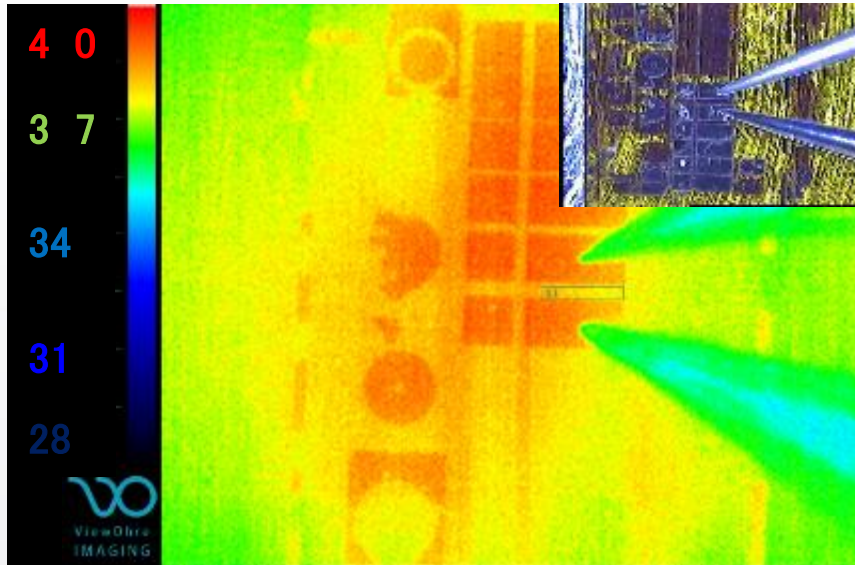
4 mm × 4 mm × 500 μm



ダイヤモンドとサファイヤ基板上に作製したTLMパターン表面の光学顕微鏡像

# ダイヤモンド/GaAs直接接合

(サーモグラフィカメラによる表面温度評価結果)

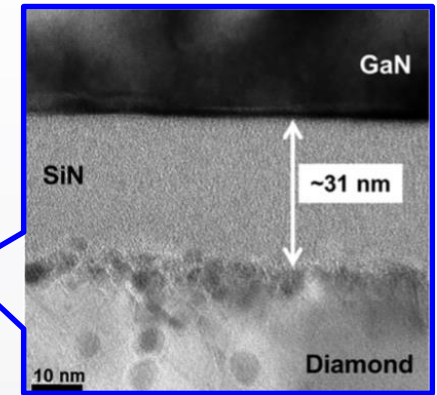
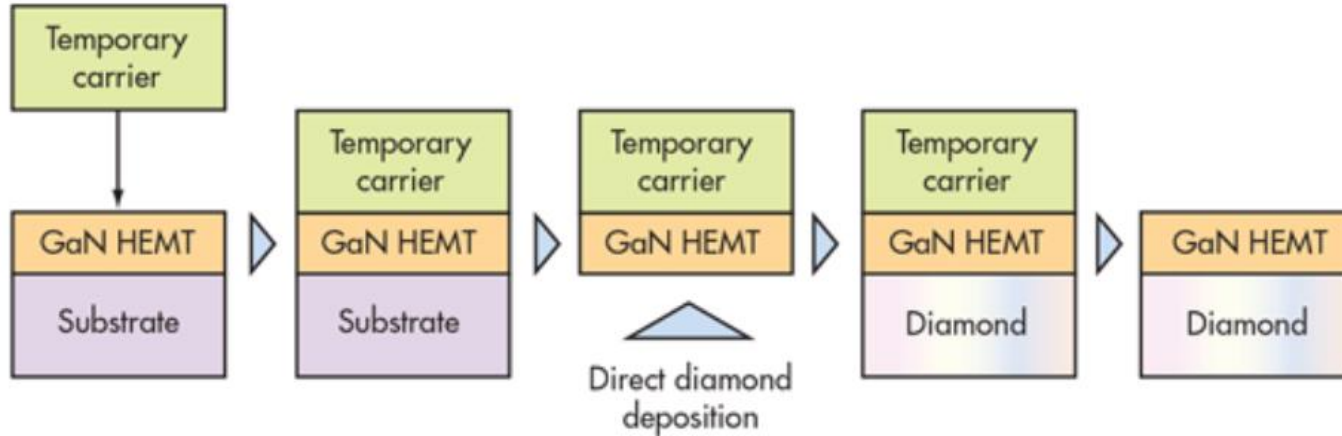


	GaAs/diamond	GaAs/Sapphire
400 mW動作時の表面温度	36.58	39.13
0 W時の表面温度	33.73	27.77

- 75%の温度上昇抑制が実現

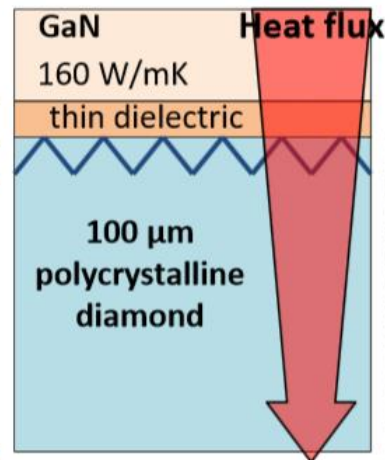


# 従来技術の課題

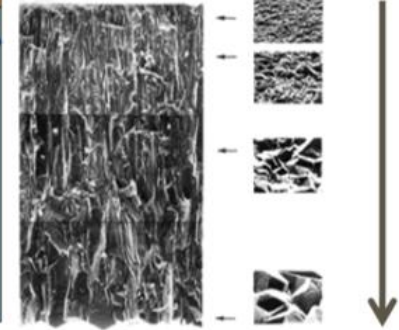


$TBR_{eff}$ : Effective thermal boundary resistance

Effective thermal conductivity:  
Weighted average, influenced by grain size.



Increasing thermal conductivity along growth direction

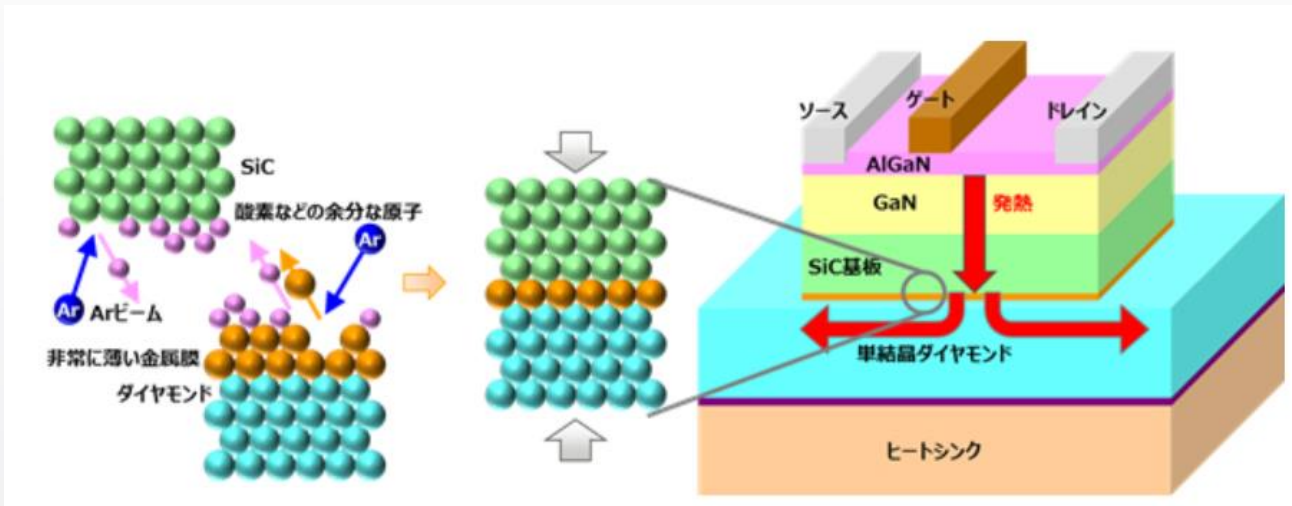


中間層と低品質ダイヤモンド層による素子の放熱を制限

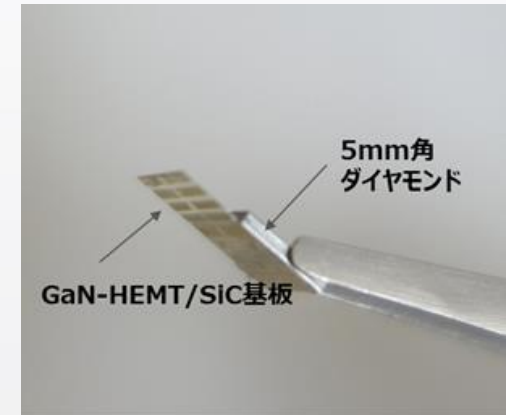


# 従来技術の課題

株式会社富士通研究所一薄い金属層を介したダイヤモンドとSiCを接合



GaN-HEMT-on-Diamond structure



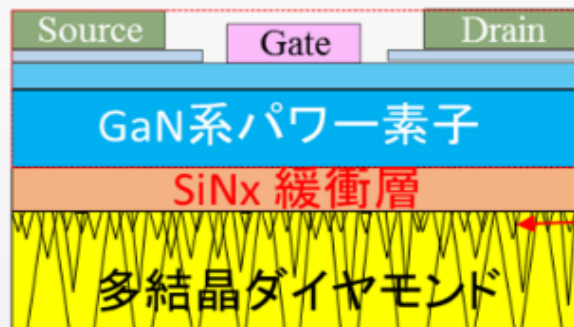
GaN-HEMT substrate with diamond bonded

金属層による熱抵抗の増加とGaN-HEMTに大きな寄生容量が発生

# 従来技術と新技術の違い

「従来構造」

大量結晶欠陥と緩衝層が放熱特性を制限



結晶欠陥

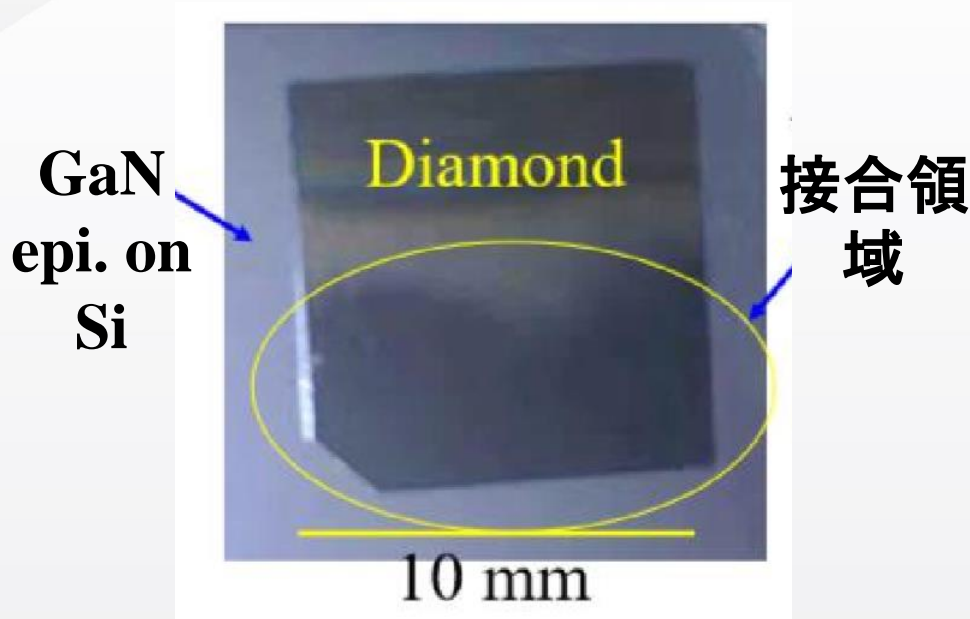
「提案する構造」

高品質と緩衝層なしにより放熱特性を向上

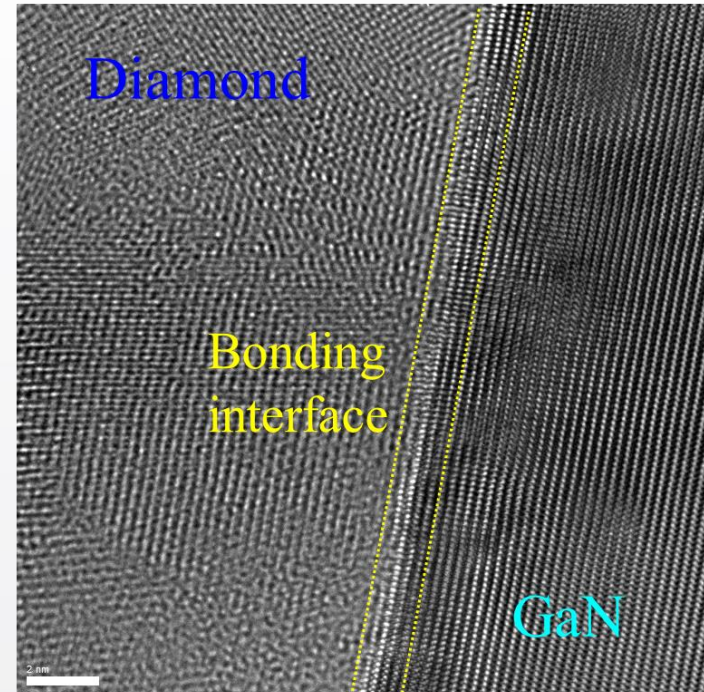


高品質ダイヤモンドと中間層なしによるGaN/Diamond直接接合構造が素子温度の上昇抑制し、素子の性能を最大限にすることが可能

# ダイヤモンド/GaN直接接合



ダイヤモンド/GaN接合試料  
表面の光学顕微鏡像



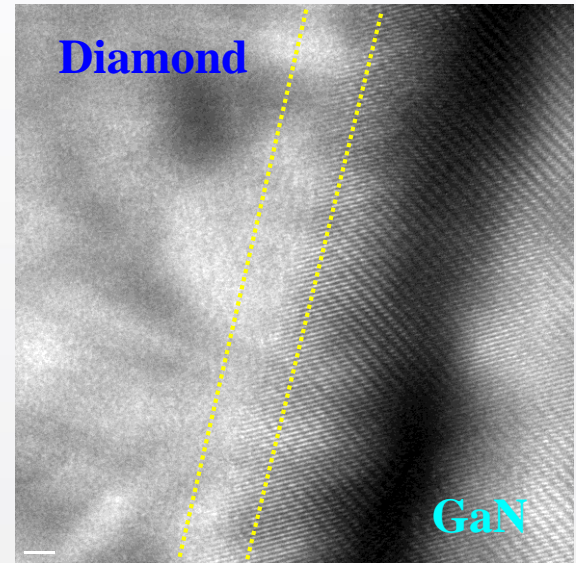
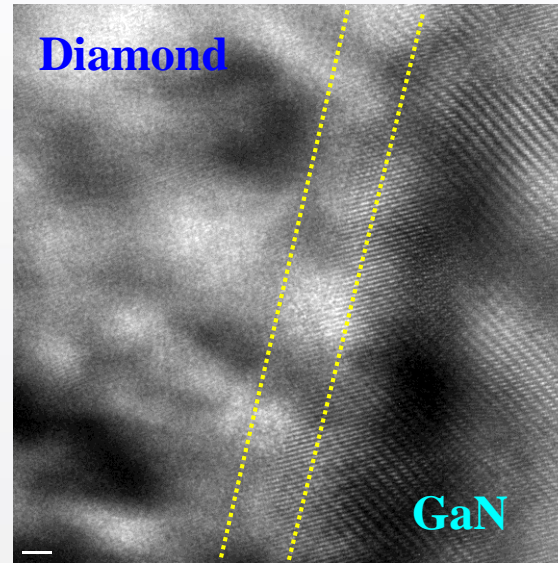
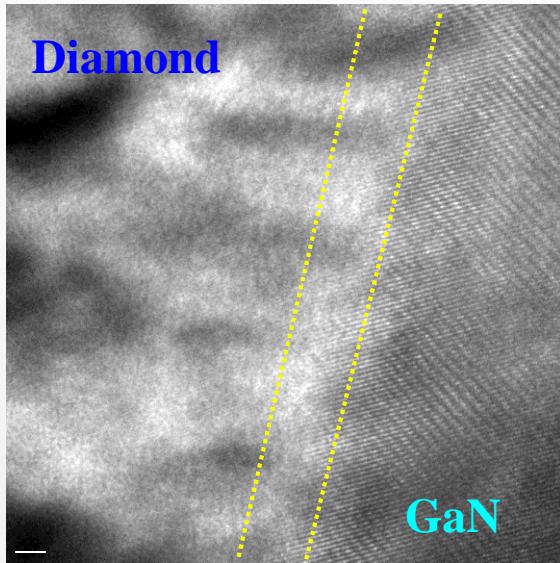
ダイヤモンド/GaN接合界面  
の断面TEM像

- 常温でGaN/Diamondの直接接合に成功
- 接合界面にナノレベルの亀裂や空洞が観察されず,高性能な接合界面の形成に実現



# ダイヤモンド/GaN直接接合

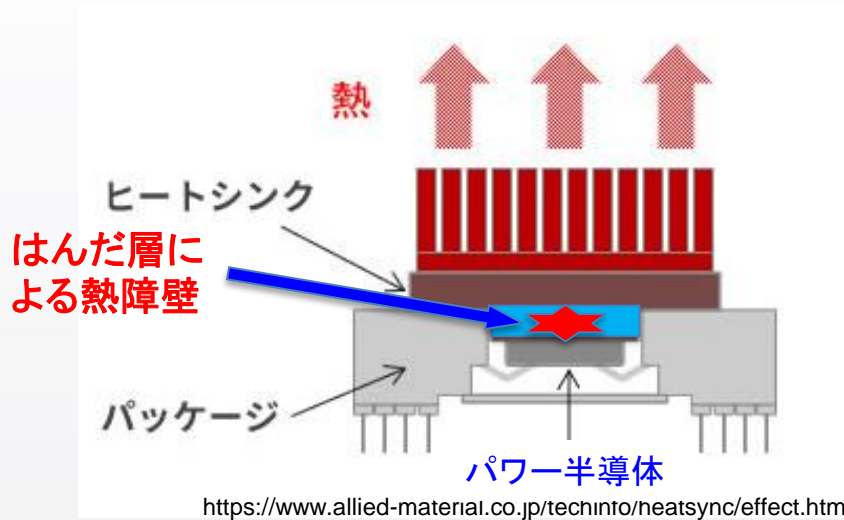
(GaN/Diamond 接合界面の熱安定性検討)



- ◆ 熱処理前後に接合界面に熱膨張係数差による亀裂や剥離が見られなかった
- ◆ 接合界面は優れた安定性を有することが実証され



# 従来技術の問題点



Thermal resistance equation

$$R_{th} = \frac{1}{2 \cdot k \cdot (x-y) \cdot \tan \theta} \cdot \ln\left(\frac{x}{y} \cdot \frac{y+2 \cdot t \cdot \tan \theta}{x+2 \cdot t \cdot \tan \theta}\right)$$

X: the width of a heat source

Y: the length of a heat source

T: the thickness

K: thermal conductivity

Θ: the heat spreading angle

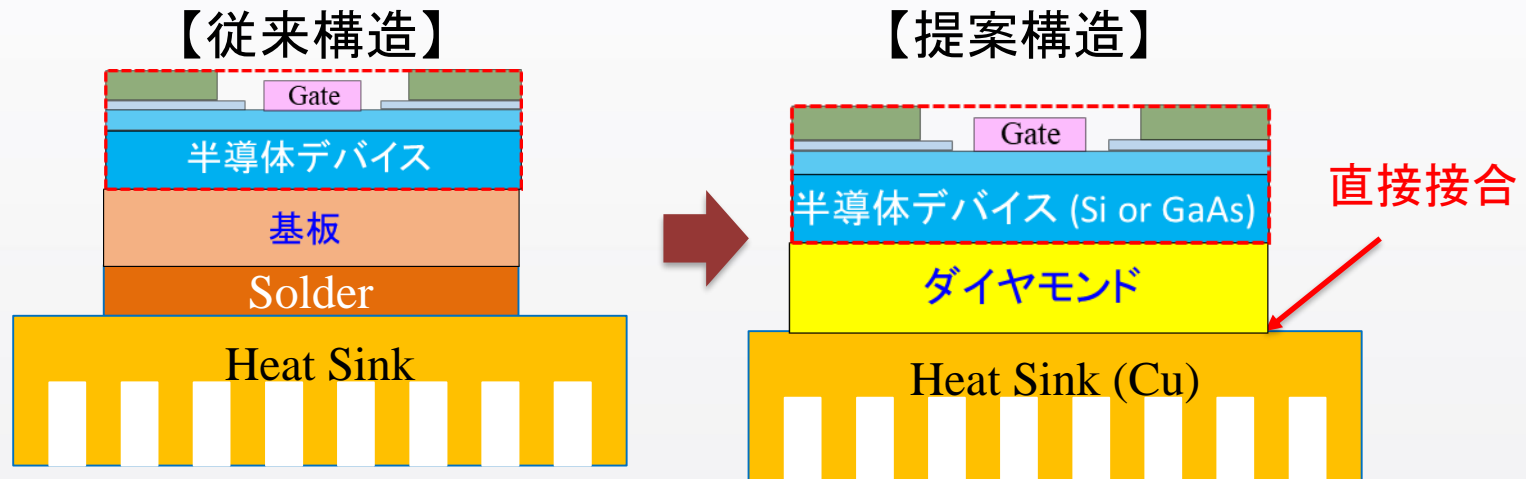
## はんだ用材料

	Diamond	Al	Cu	AlN	AuSn	AgSn
Thermal conductivity (W/cm · K)	22	2.36	3.98	0.70~2.7	0.57	0.33

はんだ層の熱抵抗が4.2 K·mm/W

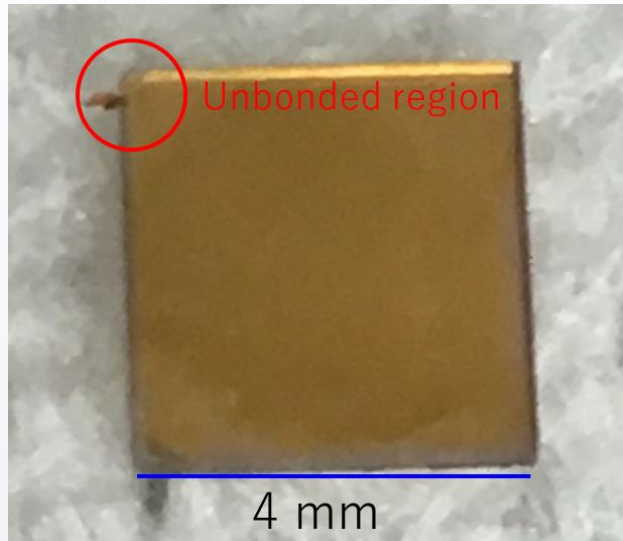
はんだ層の熱伝導率が低いため、大きな熱抵抗となる

# 従来技術と新技術の違い

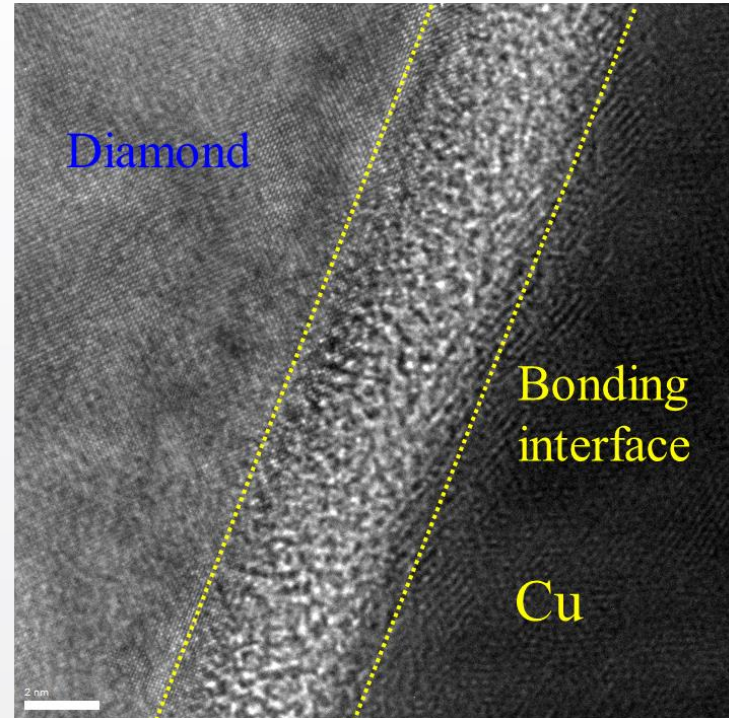


最高熱伝導率ダイヤモンドの使用とはんだ層を無くすことで、基板とはんだ層熱抵抗の低減によるパワーデバイス熱拡散特性の向上が期待できる

# ダイヤモンド/Cu直接接合



ダイヤモンド/Cu接合試料表面の光学顕微鏡像



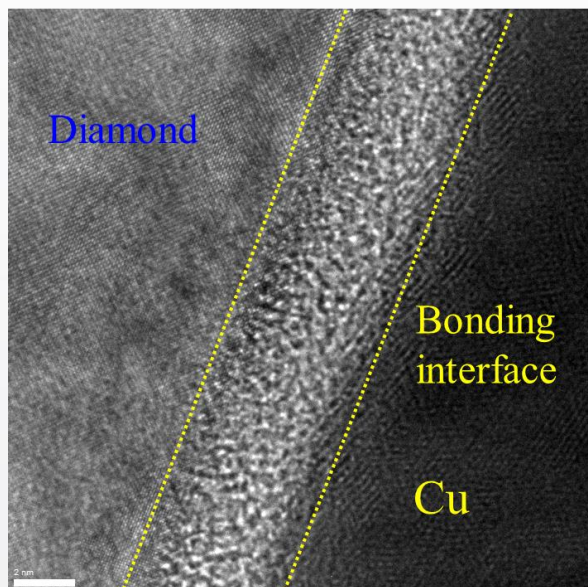
ダイヤモンド/Cu接合界面の断面TEM像

- 常温でDiamond/Cuの直接接合に成功
- ナノレベルの亀裂や空洞が接合界面に観察されず

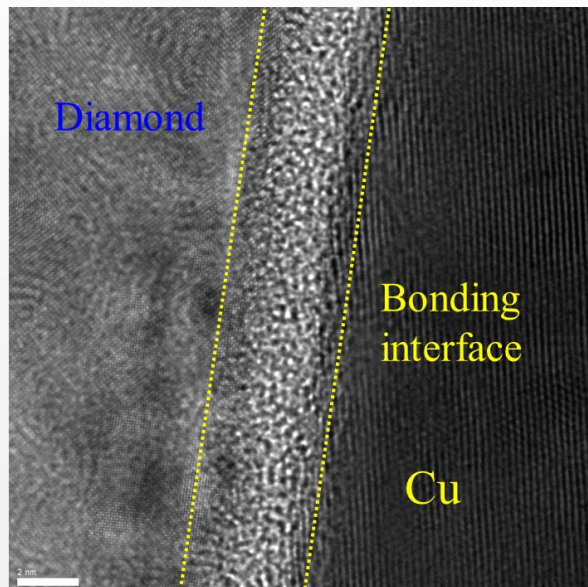


# ダイヤモンド/Cu直接接合

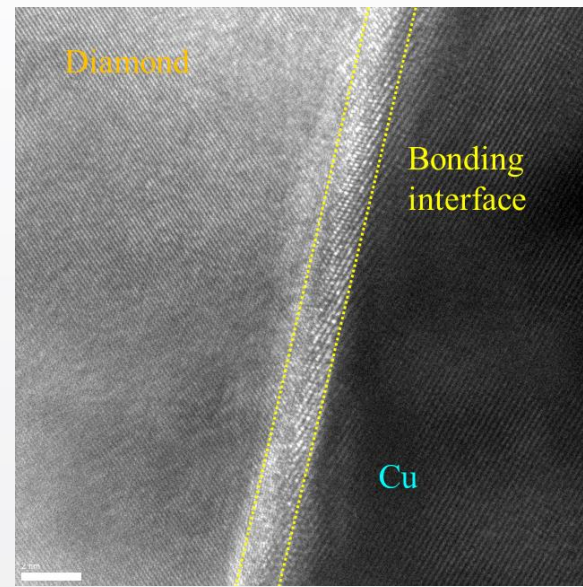
(Diamond/Cu接合界面の熱安定性実証)



As-bonded



500 °C



700 °C

- ◆ 接合界面に亀裂や空洞など観察されなかった
- ◆ 4 nm 厚みの中間層が観察され、700°Cで熱処理後に
- ◆ 700°Cほどの熱安定性を持つことが実証された



## 想定される用途

新技術	用途	メリット
ダイヤモンドと異種材料の直接接合	<ul style="list-style-type: none"><li>• パワーデバイス(トランジスタ、レーザー、ダイオード)、MEMS</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 高耐圧・高周波・高電流動作</li><li>• 高温動作</li></ul>

## 実用化に向けた課題

- 現在、常温でのダイヤモンドとSi, GaAs, GaN, Cuなどの材料との直接接合技術が開発済み。しかし、実用化に必要な大面積(3インチ以上)の接合が未解決である。
- 今後、接合界面の熱抵抗値について実験データを取得し、実用化に適用していく界面熱抵抗値の設定を行っていく。
- 実用化に向けて、大面積の接合ができるような技術を確認する必要もあり。



## 企業への期待

- 未解決の大面積の接合については、接合装置の改造により克服できると考えている。
- ダイヤモンドと異種材料の直接接合技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、電気素子の発熱に困る企業、パワー素子分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

## 産学連携の経歴

2019年度 NEDO先導研究プログラム／新産業創出新技術先導研究プログラムに採択



## 本技術に関する知的財産権

1. 発明の名称: 半導体デバイスの製造方法及び半導体デバイス

出願番号: 特願2018-094186

出願人: 公立大学法人大阪

発明者: 梁 剣波、重川 直輝、嘉数 誠

2. 発明の名称: 半導体デバイスの製造方法及び半導体デバイス

出願番号: 特願2019-125039

出願人: 公立大学法人大阪

発明者: 梁 剣波、重川 直輝



# お問い合わせ先

大阪市立大学

URAセンター URA 山崎 基治

TEL 06 - 6605 - 3550

FAX 06 - 6605 - 2058

e-mail [ura@ado.osaka-cu.ac.jp](mailto:ura@ado.osaka-cu.ac.jp)