

次世代半導体のアカデミアにおける研究開発等に関する検討会（第1回）

研究開発の俯瞰報告書

# 次世代半導体に関する国内外の研究開発動向 －ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書 (2023年版)より－

2023年12月25日

JST-CRDS

ナノテクノロジー・材料ユニット



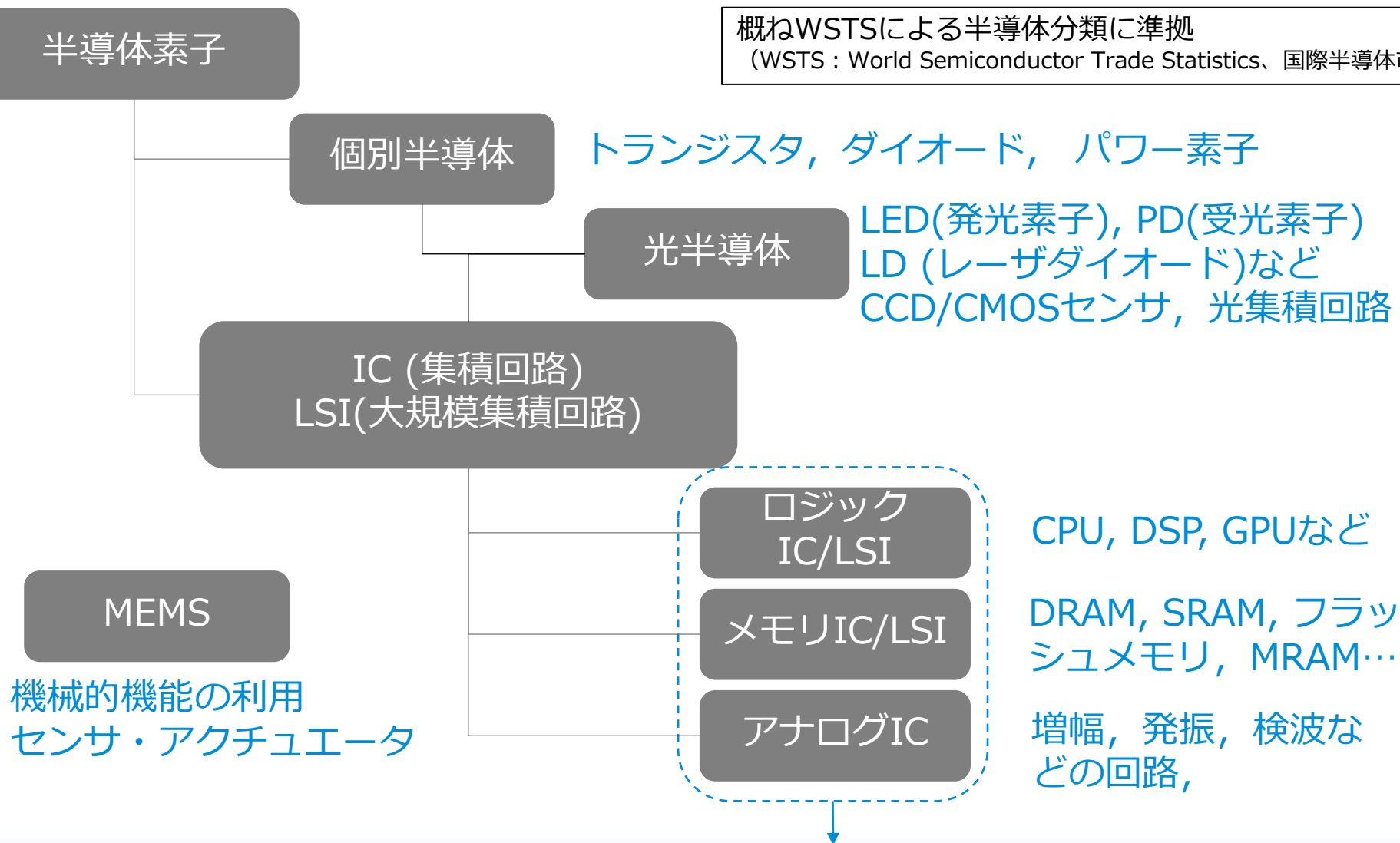
# 内容

1. CRDSの俯瞰報告書での半導体関係の研究開発領域
2. 主要な半導体の研究開発課題と動向
  - ・ 先端半導体（ロジック半導体）
  - ・ AI用半導体
  - ・ 通信用半導体・光半導体
  - ・ パワー半導体
3. 国際比較
4. まとめ

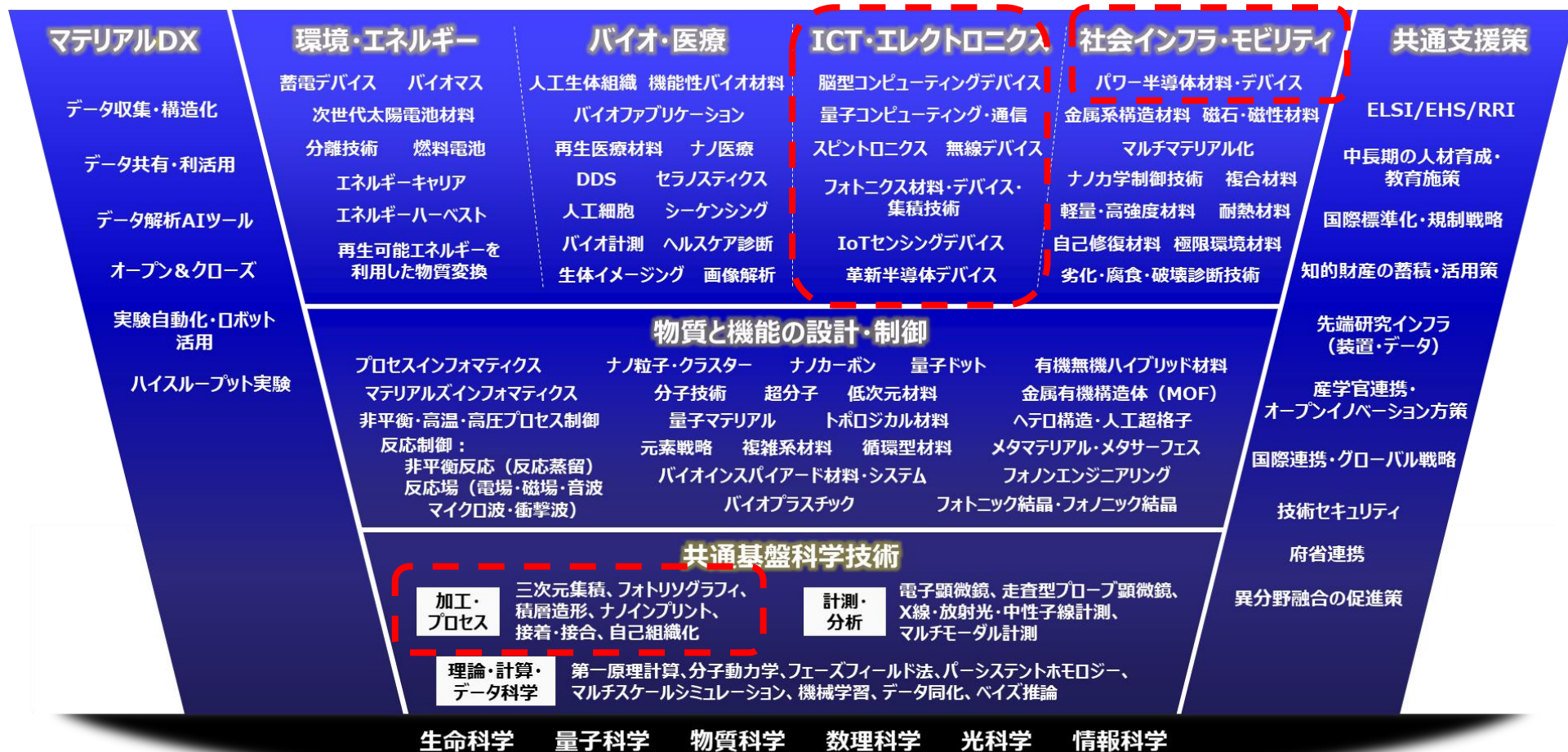
# 半導体の形態による分類

概ねWSTSによる半導体分類に準拠

(WSTS : World Semiconductor Trade Statistics、国際半導体市場統計)



# ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図（2023年）




[ ]: 半導体関係の研究開発課題

# 俯瞰報告書における研究開発領域

## 領域選定の基準

- その技術が科学の新しい潮流に基づく (エマージング性)
- その技術が社会や経済に与える影響は大きい (社会・経済インパクト)
- 日本に技術蓄積があり, その進化が漸進的に続いている (定点観測)

俯瞰区分	研究開発領域	俯瞰区分	研究開発領域
環境・エネルギー応用	次世代太陽電池材料	社会インフラ・モビリティ応用	金属系構造材料
	蓄電デバイス		複合材料
	分離技術		ナノ工学制御技術
	再生可能エネルギーを利用した燃料・化成品変換技術		パワー半導体材料・デバイス
バイオ・医療応用	人工生体組織・機能性バイオ材料	物質と機能の設計・制御	磁石・磁性材料
	生体関連ナノ・分子システム		分子技術
	バイオセンシング		次世代元素戦略
	生体イメージング		データ駆動型物質・材料開発
ICT・エレクトロニクス応用	革新半導体デバイス	共通基盤科学技術	フォノンエンジニアリング
	脳型コンピューティングデバイス		量子マテリアル
	フォトニクス材料・デバイス・集積技術		有機無機ハイブリッド材料
	IoTセンシングデバイス		微細加工・三次元集積
	量子コンピューティング・通信	ナノ・オペランド計測	
	スピントロニクス	物質・材料シミュレーション	
		共通支援策	ナノテク・新奇マテリアルのELSI/RRI/国際標準

 : 半導体関係の研究開発課題



# 半導体関係の研究開発領域の主な進展

## IoTセンシングデバイス

- MEMS、化学センサの高感度化
- 光学センサの対象の多様化
- NVセンタ利用

(IoT: センサ)

高感度、小型化、  
低消費電力化

## パワー半導体材料・デバイス

- SiC, GaNの実用化が進展
- 大口径の高品質基板開発へ
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などのUWBG半導体の基礎・基盤研究に移行

(パワー半導体)

高耐圧、低損失(低オン抵抗)、高速スイッチング

## スピントロニクス

- 核スピンゼーベック効果による極低温パワーデバイス、センサ
- スピンメカニクスのジャイロセンサ応用
- スピン波コンピューティング

## 革新半導体デバイス

- Siナノシート、CFET開発が進展
- 2次元物質への期待
- 量子コンピュータ向けクライオCMOS
- 三次元LSI
- STT-MRAMの機械学習応用

## 微細加工・三次元集積

- EUVによる3 nm世代のロジックデバイスの量産開始
- ナノインプリントのモールド作製用にマルチビームの電子ビーム描画装置が実用化
- 原子層制御のALE/ALD技術、チップレット技術が活性化

## フォトニクス材料・デバイス・集積技術

- 次世代通信、コンピューティング応用
- 2次元物質など新規物質の利用
- レーザーの小型化
- LiNbO<sub>3</sub>などの集積プラットフォームへの活用

(通信: アナログ、高周波)

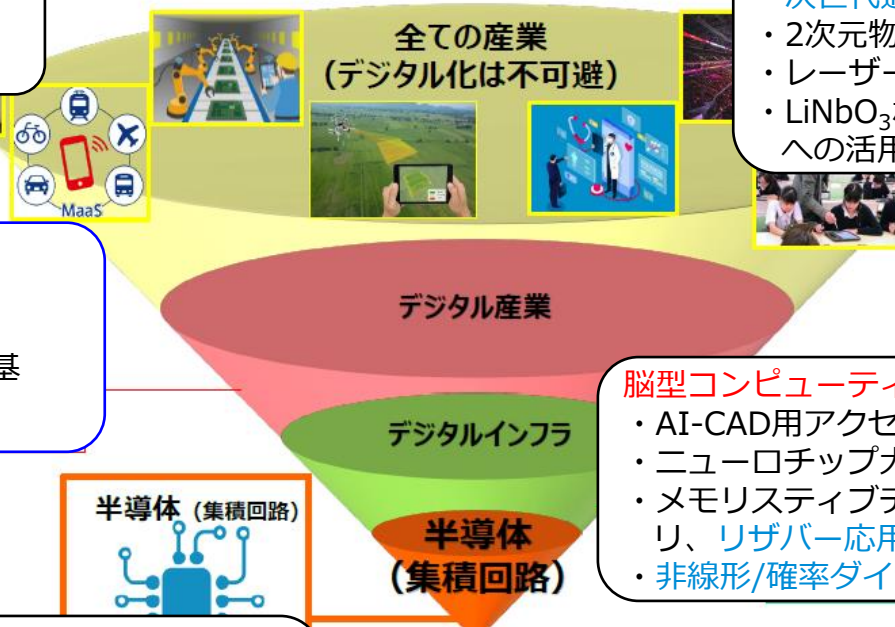
テラヘルツ波帯利用  
大容量・高速・低遅延通信

## 脳型コンピューティングデバイス

- AI-CAD用アクセラレータ
- ニューロチップ大規模化
- メモリスティブデバイスのインメモリ、リザーブ応用
- 非線形/確率ダイナミクスの利用

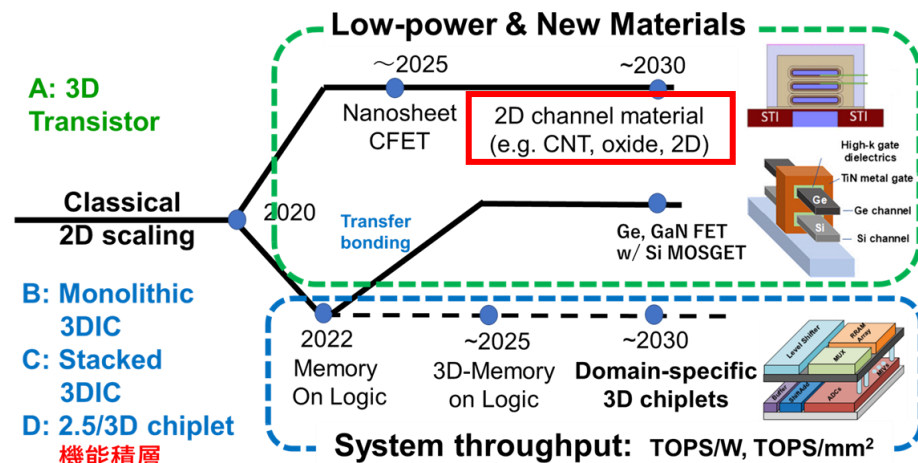
(コンピューティング:  
ロジック、メモリ)

リアルタイムAI処理、  
高速演算、低消費電力化

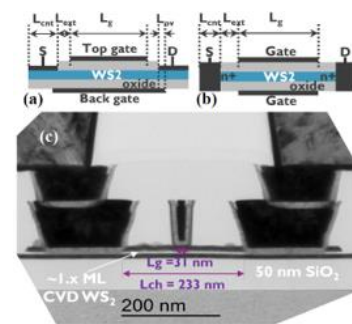
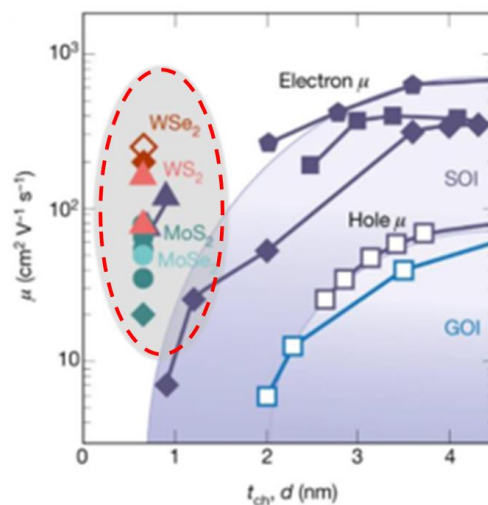


# 先端半導体（ロジック半導体）

- 2021年にIBMから2 nm世代のSiナノシートが報告され、n型及びp型Siナノシートトランジスタを上下に積層させたComplementary FET (CFET) 構造の研究開発が活発化
- さらに、その先の世代として、10nm以下の短チャンネルに対応するチャンネル厚さ（5nm以下）でも高移動度の2次元材料の導入が期待され、研究開発が開始（Imec, TSMCなど）
- 2次元材料および他材料との界面の物性・機能の理解・モデル化・制御、高品質な成膜・基板作製、デバイス構造作製・集積化などの技術開発が必要
- 3nm世代以降の配線技術においては、Cuの代替金属としてRuあるいはCoに注目
- 研究開発課題**：二次元物質、磁性材料、強誘電体材料などの新たな材料導入への成膜技術・プロセス技術など



先端半導体用トランジスタのロードマップ（IRDS2021より）



300mm CMOSプロセスで作製された2DチャンネルMOSデバイス出典: Z. Ahmed et al., IEDM2020, 22.5.1

薄膜化による移動度の低下と2次元物質（TMDC）の高い移動度（出典：Nature, 2019, 573, 507.）

# 先端半導体研究開発における我が国の問題点

## ○40nm世代より先の先端プロセスラインおよび集積技術の欠如

- ・ SoCビジネス悪化で40nm以降のラインの設備投資ができなくなり、High-k/メタルゲート、FINFETのプロセス技術が欠如
- ・ 国内に先端プロセスラインが無くなり、産業界だけでなく**アカデミアの先端半導体の研究開発力が低下**

## ○材料の基礎研究から応用デバイス開発への展開の遅れ

- ・ 日本は材料そのものの研究開発力は高い（半導体関係でもシリコンウェハ、レジスト、半導体プロセス用薬品類においては世界トップシェア）
- ・ **新たな材料をデバイスやプロセスに適用・応用して実用化するスピードが遅く、他国がリード（High-k/メタルゲート、Cu/Low-k配線など）**

## ○製造装置に強みはあるが先端半導体の主要部分が欠如

- ・ 日本の製造装置も洗浄装置、スパッタ装置などで強みを持つが、EDAツール、以前は強かった露光装置、**ゲートスタック周りが弱い**

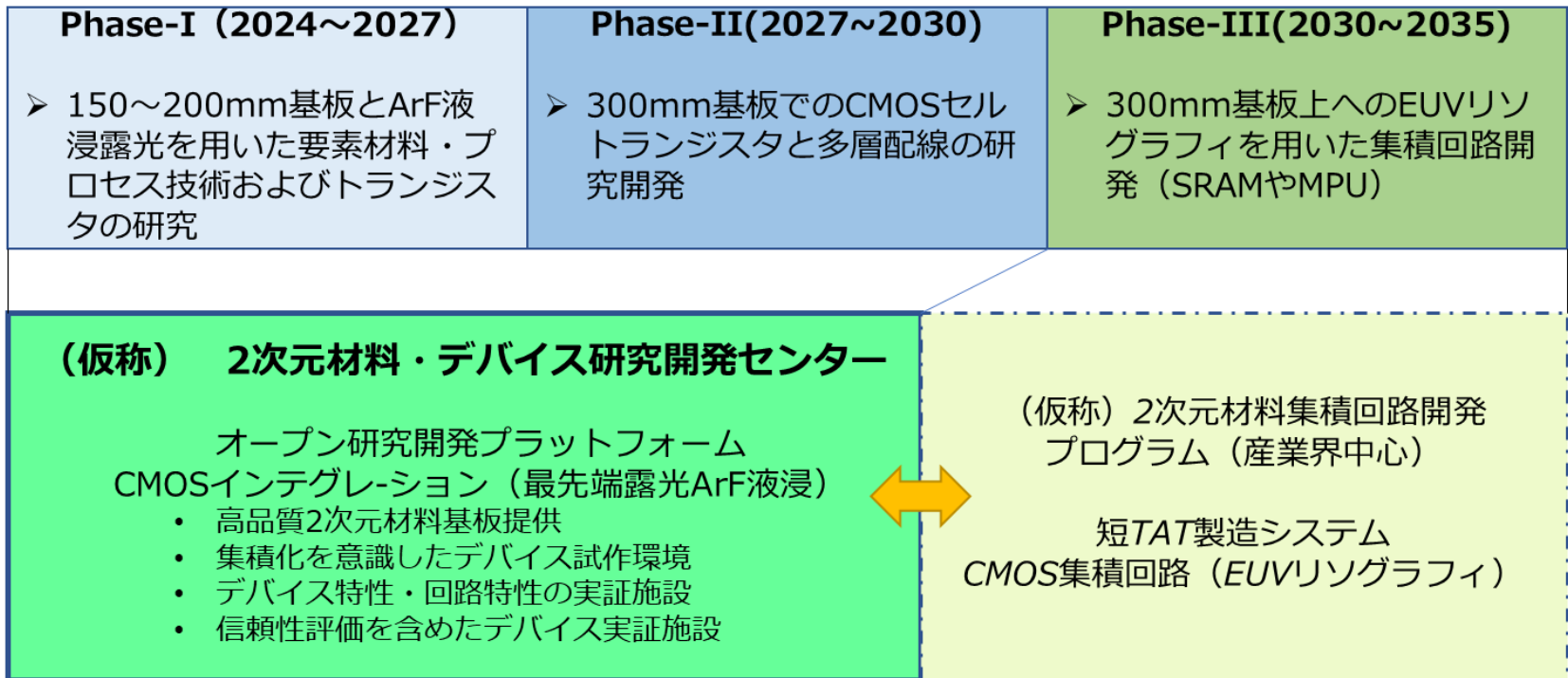
## ○半導体人材の不足、連携不足、国際的存在感低下

- ・ 国内の半導体メーカーのシェア低下で、半導体に対する学生の魅力が低下
- ・ 国内学会においては産業界の発表が低下し、アカデミアが産業上の課題を知る機会が無く、産学連携、材料とデバイス研究者の交流・連携が低下
- ・ **先端プロセスによるデバイス・回路研究発表ができず、国際的存在感が低下**



# デバイス作製のための共用施設の整備と活用

(プロセス・デバイス・回路試作・検証が可能なオープンプラットフォームの提案)



ウエハエクスチェンジ&人材交流

**基礎・基盤研究 (分散研)**

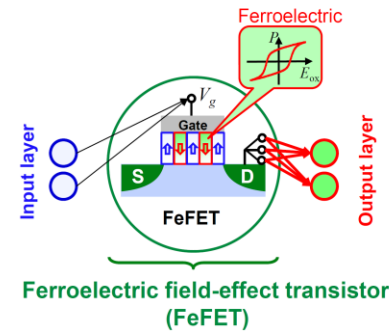
ARIM マテリアル先端リサーチインフラ

- ・東北大学：ナノテク融合技術支援センター
- ・NIMS：ナノテクノロジー融合ステーション
- ・産総研：ナノプロセス施設
- ・東京大学：マテリアル先端リサーチインフラ・データハブ拠点
- ・豊田工大：ナノテクノロジーセンター
- ・京都大学：ナノテクノロジーハブ拠点
- ・広島大学：ナノデバイス研究所

戦略プロポーザル「半導体デバイス革新に向けた材料開発戦略～2次元半導体材料の新規導入～」CRDS-FY2022-SP-06より

# AI用半導体

- 低電力AIアクセラレータ、インメモリコンピューティング、リザバーコンピューティング、ニューロチップの研究開発が進展（米国、欧州、台湾、韓国など）
- メモリスティブデバイス（ReRAM、メモリスタなど）の特性を利用し記憶装置と演算器のを一体化する**インメモリコンピューティング**、強誘電体材料や、スピン、光を用いた**物理リザバーコンピューティング**などが活発化
- 長期的には**脳型コンピューティングの低エネルギー性の理解**、生物機能の仕組みを物理的に模擬し機能を**実現するデバイスの検討が重要**
- 研究開発課題**：膨大なデータを必要とする学習の効率化やエッジでの学習を可能とする**新たな回路・アルゴリズム**と、それを効率的に実行できる**デバイス技術の開発**



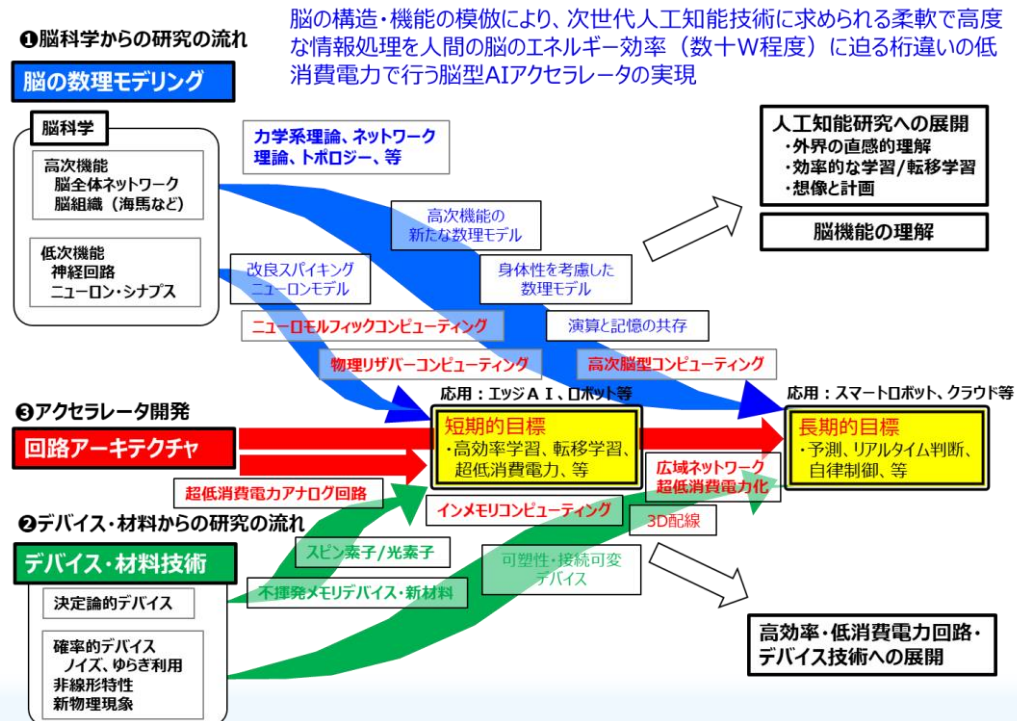
### Minimum requirements

- ✓ Short-term memory
- ✓ Nonlinear mapping

### Additional requirements for system implementation

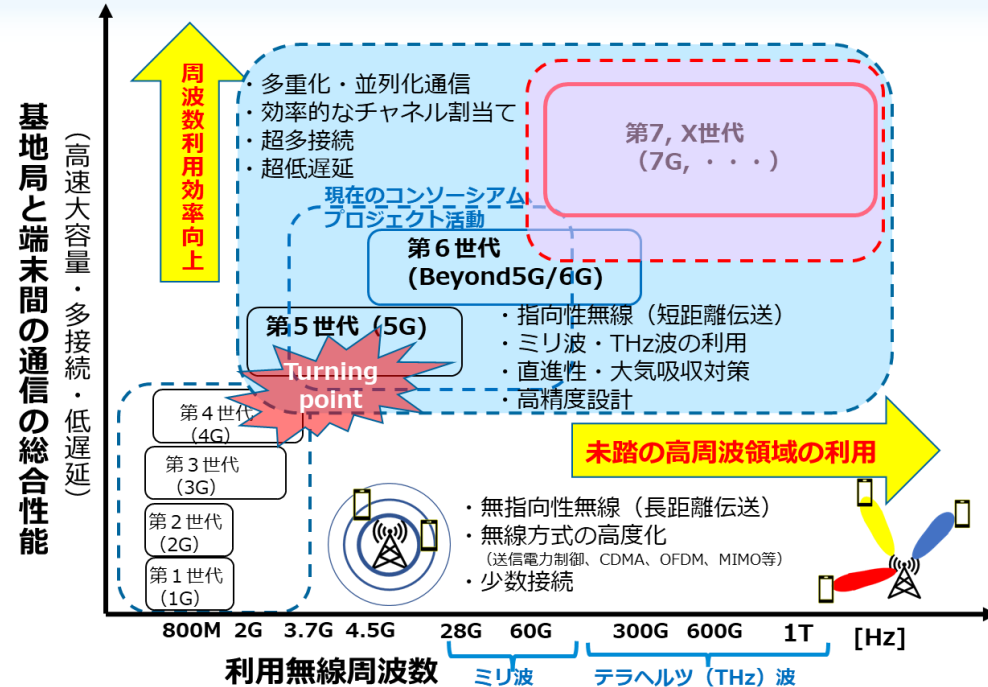
- ✓ Scalability (Large-scale integration)
- ✓ CMOS compatibility (integration with other AI technologies)

強誘電体トランジスタを用いたリザバーコンピューティング（出典：E. Nako, et al., Symposia on VLSI Technology and Circuits, TN1.6 (2020)）

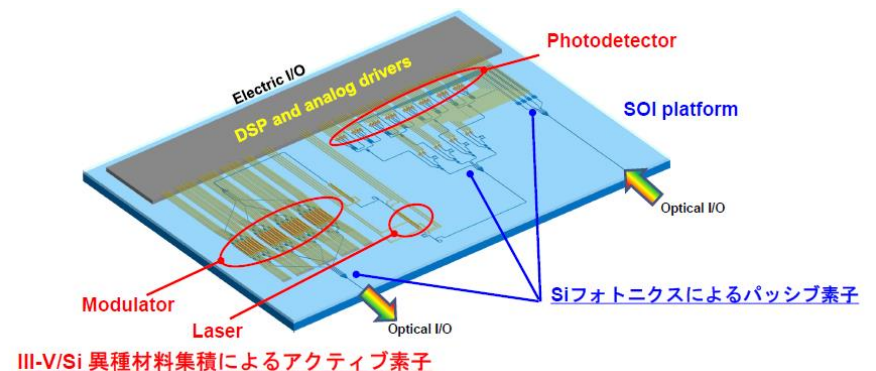


# 通信用半導体・光半導体

- 次世代通信応用として、IOWN構想など**オールフォトニックネットワーク**の実現や、**テラヘルツ利用の次世代無線通信**に向けた活動が活発化（日米欧）
- シリコンフォトニクス技術をベースに光回路と電気回路を同時集積する**光電融合集積技術**、**光集積回路を用いたAIアクセラレータ**などが進展
- 2次元材料やトポロジカル絶縁体などの**新奇物質に関する光物性**、**トポロジカルフォトニクスの特異な光伝搬特性**、**レーザーの小型化が可能なフォトニック結晶ナノ共振器構造やプラズモニクス構造**などの材料研究に注目
- 研究開発課題**：シリコンフォトニクスのチップと様々な機能材料・デバイスを**モジュールとして集積する技術**、外部と光集積回路との**光接続部分**などの**実装技術**、**システム的な視点での研究開発**



次世代無線通信技術（科学技術未来戦略ワークショップ報告書「次世代通信技術の高度化に向けた無線・光融合基盤技術」CRDS-FY2021-WR-07より）



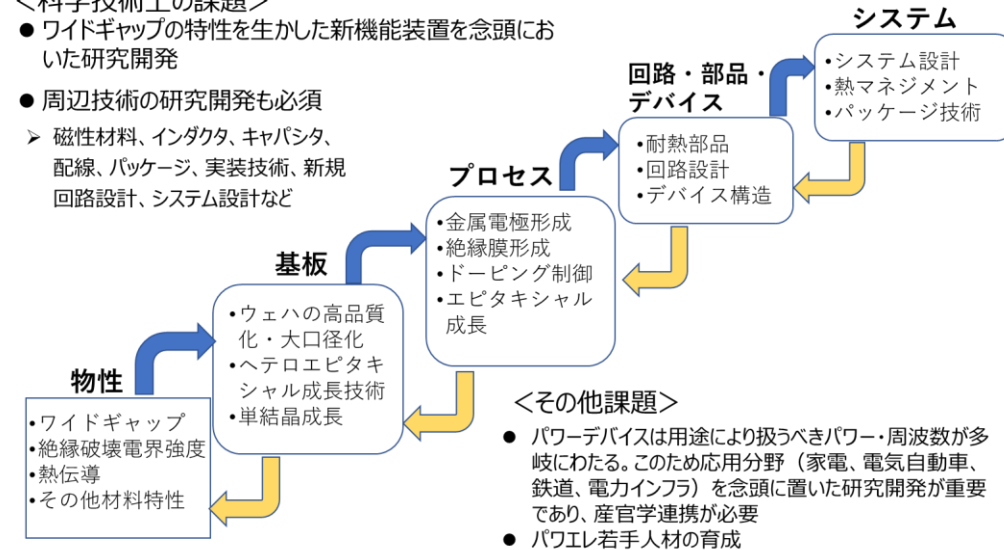
異種材料集積技術を利用した大規模光集積回路 (CRDS-FY2021-WR-07より)

# パワー半導体

- Siパワー半導体は大口徑ウェハ（300mmライン）量産技術開発、低コスト化が進展
- SiC, GaNの実用化が進展し応用研究が活発化。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などのUWBG半導体の基礎・基盤研究のファンディング増加
- 200mmSiCウエハの開発や高品質結晶成長技術、SiCデバイスにおける電流駆動能力向上のFin構造の採用や、ドリフト層低抵抗化のSuper-Junction構造の研究開発が推進
- GaNでは自立基板の研究開発が進展
- β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のバルク単結晶融液成長技術（CZ法、EFG法、ブリッジマン法）が進展。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの研究開発が活発化（欧米中）
- 研究開発課題：SiCウェハ、GaNウェハの欠陥制御、キャリア濃度の制御、デバイス試作プラットフォーム整備、UWBG研究強化

## <科学技術上の課題>

- ワイドギャップの特性を生かした新機能装置を念頭においた研究開発
- 周辺技術の研究開発も必須
  - ▶ 磁性材料、インダクタ、キャパシタ、配線、パッケージ、実装技術、新規回路設計、システム設計など



パワー半導体デバイスおよびその応用に向けた課題（文部科学省研究開発局「パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する検討会」第1回検討会資料より）

	AlN	ダイヤモンド	β-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	GaN	4H-SiC	GaAs	Si
バンドギャップ (eV)	6.2	5.5	4.5~4.9	3.4	3.3	1.4	1.1
臨界電界強度 (MV/cm)	12	8	~8 (推定)	~3.5	2.8	0.4	0.3
電子飽和速度 (cm/s)	2.2×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>	1.8~2×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>	2.2×10 <sup>7</sup>	2.0×10 <sup>7</sup>	1.0×10 <sup>7</sup>
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /V·s)	1,090	2,000	300	~1,000	1,000	8,500	1,350
熱伝導度 (W/cm·K)	2.9	20	0.1~0.3	2	4.9	0.5	1.5
Baligaのパワーデバイス性能指数 (BFN)	36,000	13,000	~3,000	~900	500	16	1

各種半導体のパワーデバイス材料特性比較（同上）



# 国際比較

## (日本)

- ・スピントロニクス、パワー半導体は優位性を保持
- ・先端半導体技術で欧米韓台に遅れを取り、研究開発力の強化、人材育成が課題

## (米国)

- ・半導体に関わる全ての研究領域で基礎、応用ともに優位性を保持

## (欧州)

- ・半導体関係の基礎研究で優位性があり、応用を強化

## (中国)

- ・半導体関係の研究開発ではまだ優位性を持つには至っていないが、急速に追いあげて存在感が向上 (AIチップなど)

## (韓国)

- ・半導体関係の基礎研究・論文ではあまり目立たないが、製造技術で優位性保有

## (台湾)

- ・半導体関係の基礎研究では目立っていないが、先端半導体の製造技術では世界トップレベル。AIチップ開発でも存在感

研究開発領域	国	フェーズ	革新半導体デバイス		脳型コンピューティングデバイス		フォトニクス材料・デバイス・集積技術		IoTセンシングデバイス		スピントロニクス		パワー半導体材料・デバイス		微細加工・三次元集積	
			現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	◎	→	○	↘	
	応用・開発	○	↗	△	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	◎	→	
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	
	応用・開発	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	
欧州	基礎	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	
	応用・開発	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	○	↗	◎	↗	◎	↗	
中国	基礎	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	△	↗	
	応用・開発	◎	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	△	↗	
韓国	基礎	○	↗	△	→	△	→	△	→	○	↗	△	→	○	→	
	応用・開発	△	→	○	→	△	→	△	→	○	↗	△	→	○	→	

次世代半導体関係の国際比較



# 次世代半導体の研究開発に関するまとめ

- デジタル化社会を支える技術分野であり、世界的に競争が激化
- 欧米がリードし中国の追い上げが激しいが、日本もスピントロニクス<sup>①</sup>の基礎研究やパワー半導体<sup>②</sup>で優位性を保持
- 先端的な半導体デバイス・製造技術<sup>③</sup>の獲得、研究開発力の強化、半導体人材の育成が日本の課題
- 半導体産業強化政策に歩調を合わせた長期的な研究開発施策、先端技術開発が可能な共用施設<sup>④</sup>が必要

## 先端半導体

従来のCMOSを超える新構造・新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現をめざす研究開発に期待。Si系以外の新材料チャネルの登場も視野に。



世界的な研究開発トレンド・技術開発の潮流

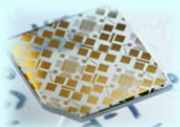
## 脳型AIチップ<sup>⑤</sup>

高エネルギー効率でAI処理を行う脳型AIチップ開発で、デジタル・アナログNN回路、コンピュータインメモリ、ニューロモルフィック、リザパーコンピュータ<sup>⑥</sup>の発展が進展。



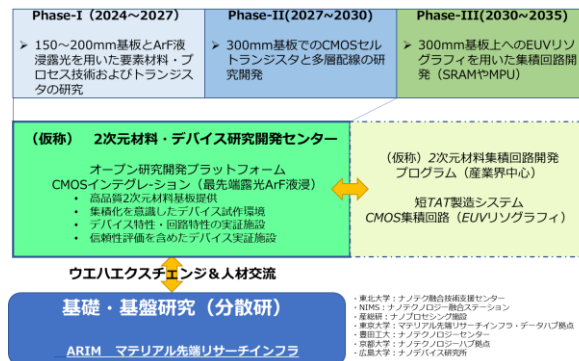
## 次世代パワー半導体

SiC、GaNの実用化が進み、Siとともにデバイス高性能化、ウェハの大口径化へ。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などウルトラワイドバンドギャップ半導体の開発が活発化。



研究開発領域	革新半導体デバイス		脳型コンピュータチップ		フォトニクス材料・デバイス集積技術		I/Oセンシングデバイス		スピントロニクス		パワー半導体材料・デバイス		微細加工・三次元集積		
	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	基礎	○	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	◎	→	○	↓
	応用	○	↑	△	→	○	→	○	→	○	→	◎	→	◎	→
米国	基礎	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→
	応用	◎	↑	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↑	◎	→	◎	→
欧州	基礎	◎	↑	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→
	応用	◎	↑	◎	→	◎	↑	◎	→	○	↑	◎	↑	◎	↑
中国	基礎	○	→	○	↑	○	↑	○	↑	◎	↑	○	↑	△	↑
	応用	◎	↑	○	↑	○	↑	○	↑	△	↑	○	↑	△	↑
韓国	基礎	○	↑	△	→	△	→	△	→	○	↑	△	→	○	→
	応用	△	→	○	→	△	→	△	→	○	↑	△	→	○	→

次世代半導体関係の国際比較



プロセス・デバイス・回路試作・検証が可能なオープンプラットフォーム (共用施設) の案 (CRDS-FY2022-SP-06より)

# 參考資料

# 次世代半導体関係の研究開発領域の概要、主な進展、見えてきた課題

研究開発領域	概要	主な進展	見えてきた課題
革新半導体デバイス	従来のCMOSの限界性能を超える新動作原理のデバイスを開発し、超高速・超低消費電力でデータ処理する集積システムの実現をめざす。	微細化・高性能化に向けたゲート長短縮に必要なチャネルの薄膜化に対応したSiナノシート、CFETの開発	二次元物質、磁性材料、強誘電体材料などの新たな材料導入への成膜技術・プロセス技術の研究開発
脳型コンピューティングデバイス	人間の脳の情報処理を模倣した回路、そこに利用する革新的な材料・デバイスの基盤技術の開発により、人間のように高度な判断や予測、制御などを超低消費電力で行うことができるAIアクセラレータ・チップを実現する。	低電力AIアクセラレータ、インメモリコンピューティング、リザーバコンピューティング、ニューロチップ、メモリスティブデバイスの開発、非線形/確率ダイナミクスの利用	膨大なデータを必要とする学習の効率化やエッジでの学習を可能とする新たな回路・アルゴリズムと、それを効率的に実行できるデバイス技術の開発
フォトニクス材料・デバイス・集積技術	光の多様な現象・機能を利用して高性能／高機能な光学材料や光デバイスを創出し、エレクトロニクス技術との融合と様々なデバイスの集積により、新たな機能を有するチップ・モジュール・装置を実現する。	次世代通信応用、コンピューティング応用、二次元物質など新規物質の利用、レーザーの小型化、LiNbO3などの集積プラットフォームへの活用	シリコンフォトニクスのチップと様々な機能材料・デバイスをモジュールとして集積する技術、外部と光集積回路との光接続部分などの実装技術、システム的な視点での研究開発

# 次世代半導体関係の研究開発領域の概要、主な進展、見えてきた課題

研究開発領域	概要	主な進展	見えてきた課題
IoTセンシングデバイス	MEMSセンサを代表とする高性能・高機能なセンシングデバイスの研究開発により、健康で便利に暮らせ安心・安全なスマート社会の基盤となるInternet of Things (IoT) を実現する。	MEMS、化学センサの高感度化、光学センサの対象の多様化、NVセンター利用	小型・高性能な物理センサを実現するためのMEMS技術や3次元集積回路技術の高度化、化学センサの安定性・再現性の向上、量子センサの高感度化や集積化技術の開発
スピントロニクス	固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方を工学的に応用する分野であり、電荷の自由度のみに基づく従来のエレクトロニクスでは実現できなかった機能や性能を持つデバイス実現をめざす。	熱スピン流に基づいた熱電変換をめざすスピнкаロリトロニクスや物質のトポロジカルな性質に着目したスピン流の制御、スピントロニクスで発展した技術の量子状態制御への応用、スピンを用いた人工知能デバイス研究など	応用に向けた材料・デバイス特性の向上、様々な分野の専門家や産業界を巻き込んだ連携の強化 まだ基礎研究レベルのものが多いため、デバイスの性能向上や実用化の指針を示す取り組みが重要
パワー半導体材料・デバイス	高効率の電力変換を可能にする電力制御用半導体素子（パワーデバイス）を、その応用技術とともに研究開発する。	SiC, GaNの実用化が進展し、大口径の高品質基板開発へ Ga2O3などのUWBG半導体の基礎・基盤研究に移行	パワーデバイスの高耐圧化、高信頼化、ばらつき低減に重要なSiCウェハ、GaNウェハの欠陥制御、キャリア濃度の制御、デバイス試作プラットフォーム整備、UWBG研究強化
微細加工・三次元集積	シングルナノメートルレベルまでのシリコンの微細加工プロセスの高度化および三次元集積を実現する。	EUVによる3 nm世代のロジックデバイスの量産開始、ナノインプリントのモールド作製用にマルチビームの電子ビーム描画装置が実用化、原子層制御のALE/ALD技術、チップレット技術が活性化	EUV光源のさらなる高出力化、LWRの低減、レジストのパターン倒れの抑制、ナノインプリントのバブル欠陥抑制方法、ALD/ALEの選択的な吸着技術、半導体人材の育成

# 次世代半導体関係の研究開発領域の注目トピックスと動向

## 革新半導体デバイス

### ■注目しているトピックス・動向

- 2021年5月にIBMから2 nm世代のSiナノシートが報告され、研究開発レベルでFinFETからの構造進化が著しい。
- 高NA型のEUVを駆使することで、n型及びp型Siナノシートトランジスタを上下に積層させたComplementary FET (CFET)構造の研究開発が進んでいる。
- それらの後の世代として、単層で3原子厚さの2次元材料の導入が期待されている。
- 物理ゲート長が10 nmを超えたところで停滞感のあるSiと比較して、2次元材料では3.9 nmのゲート長での6桁の電流変調が報告されており、強い短チャネル耐性が実証されている。
- 5nm世代対応の配線においては、従来のCu配線金属を使える見込みであるが、3nm世代以細においては決着がついていない。代替金属としては、RuあるいはCoが最有力である。
- TSMCは2021年に5nm世代の製品集荷を開始し、現在3nm世代の量産化開発を実施している。3次元構造トランジスタGAAFETの実用化は2nm世代からとしている。サムソンは、7nm世代から4nm世代までの4つのFinFETプロセスを極端紫外線(EUV)露光技術で製造し、その後、同じくEUVを利用して3nm世代 GAA、MBCFETの製造を行なう
- NANDフラッシュメモリにおいては、(1)高積層構造形成プロセス、(2)超多値化、(3)高速インターフェースがキー技術となる。高積層構造を形成するプロセス技術の高コスト化が大きな課題
- PCM(Phase Change Memory)においては、AIなどの分野への応用が米国主導で進められている。
- MRAMにおいては、STT-MRAMの機械学習への応用が、提案され検討が加速されている。MTJを用いた確率コンピューティング、リザーバーコンピューティングの応用も、提案されている。

## 脳型コンピューティングデバイス

### ■注目しているトピックス・動向

- (領域の範囲) (1) 脳神経ネットワークの代替デバイス、(2) 深層学習など現行AIの低電力実行、(3) リザーバコンピューティング等のニューロインスパイアードコンピューティング、(4) 脳神経系の情報処理を再現することによって次世代AI基盤技術の創出を目指すニューロミメティックコンピューティングなど。
- (AIアクセラレータ) TPU4、5 (2021年Google) によるAICAD (AIによる最適回路配置配線) でLSIの短期開発・小型化を実証。
- (ニューロモルフィックチップ) Loihi2 (2021年Intel)は先代の微細化版で実効ニューロン数を8倍にし、細胞モデルと学習機能に柔軟性・発展性を加えた。
- (メモリスティブ(memristive)デバイス: ReRAMやメモリスタなど) これらのデバイスの特性を利用して記憶装置と演算器のを一体化して、インメモリコンピューティングなど脳型コンピューティングの実現を目指す研究が活発。メモリスタのアナログ動作に時間軸上での変化を付与したデバイスに関しては、物理リザーバコンピューティング等への応用研究が盛ん。イオン液体にCuを溶かした材料を用いたデバイスでは、混合イオン液体においてリザーバコンピューティング性能の評価もなされている。
- (新たな方向) 脳型コンピューティングの低エネルギー性を理解し利用していくためには、非線形ダイナミクス・確率ダイナミクスに目を向けることが重要であり、身体の力学的運動の源である「ブラウンラチェット」、感覚や情報伝搬に関わる「確率共鳴」、身体運動や感覚の情報を計算に取り込む時系列情報処理を行う「リザーバ計算」などに着目し、これら生物機能の仕組みを物理的に模擬し機能実現するデバイスの検討が必要になる。



# 次世代半導体関係の研究開発領域の注目トピックスと動向

## フォトニクス材料・デバイス・集積技術

### ■注目しているトピックス・動向

- (応用) 次世代通信応用として、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想によるオールフォトニックネットワークの実現を目指す動きや、テラヘルツ利用に向けた活動が活発化している。光集積回路のAIアクセラレータ、ニューラルネットワーク、ニューロモルフィックコンピューティングなどのコンピューティング技術への応用は、学術、産業、社会のいずれにおいても注目分野の一つとなっており、関連ベンチャー企業、LightmatterやLightelligenceも大きく成長している。センサ応用としてはLiDARがここ数年でも大きく進展している。
- (材料) 2次元材料やトポロジカル絶縁体、ワイル半金属、反強磁性体などの新奇物質に関する光物性研究もホットな話題になっている。特に、トポロジカルフォトニクスは、トポロジカルな性質を反映した特異な特性が報告やエッジモードを用いたリング共振器による周波数コムなど様々な応用の提案もなされている。
- (デバイス) フォトニック結晶ナノ共振器構造を用いたレーザで極低閾値での室温連続電流注入発振の達成、プラズモニクス構造のレーザへの適用により、波長よりもはるかに小さいサイズのレーザ発振動作、シリコンフォトニクスをベースにした小型で集積化可能な素子などが報告されている。
- (集積技術) 薄膜ニオブ酸リチウム薄膜 (LiNbO<sub>3</sub>)、グラフェン等の2次元物質といった新しい材料や有機光学材料など従来の光回路では用いられてこなかった材料が、ナノフォトニクスプラットフォームと組み合わせられて、飛躍的な性能向上が実現されている。また、シリコンフォトニクス技術をベースにして、光回路と電気回路を同時集積する光電融合集積技術も進展している。

## IoTセンシングデバイス

### ■注目しているトピックス・動向

- (MEMS技術) MEMSのセンサの技術は継続的に革新され、低コスト化・小形化と高性能化が進展。高性能MEMSマイクロフォンを用いて、CO<sub>2</sub>の長期間・高感度モニタリングに好適なCO<sub>2</sub>を光音響法で検出するガスセンサも登場している。静電容量式で汎用的な気圧センサの高性能化が進み、1 Pa (100万分の1気圧) 以下のノイズレベルで数cmの上下動を測定できる水準のものが製品化。
- (化学センサ) 金属酸化物や有機高分子などに変わる新たなガスセンサ材料として、金属有機構造体(MOF)が注目されている。食品から揮発する分子群を計測し、食品の状態をモニタリングする技術が注目されている。基礎研究レベルでは化学センサを用いた食品揮発分子のセンシングも数多く実証。人工嗅覚センサによる新型コロナウイルス(COVID-19)感染者の診断試験が欧州やアメリカ、中国などで実施。人工嗅覚センサで取得した呼気パターンで、感度98-100%、特異度78-84%で新型コロナウイルス感染者の判別に成功。
- (光学センサ) 近年実用化され普及しつつあるものとして、①3Dイメージング技術(パターン光を利用した測距イメージング)、②TOF(Time of Flight)方式測距機能イメージング技術、③LIDAR (light detection and ranging)技術、④SPAD(Single Photon Avalanche Diode)センサ技術、⑤偏光イメージセンサ技術がある。
- (量子センサ) 量子性の積極利用や量子限界に迫る精密制御によって、従来手法よりも感度が高いセンシング、計測が可能となる。ダイヤモンド中のNV中心は、磁場、電場、温度、圧力などの物理量を高感度にセンシングでき、さらに極低温だけではなく室温においても動作するため、生命現象や細胞内環境の精密計測、高感度なウイルス検出など幅広い分野での応用が期待される。

# 次世代半導体関係の研究開発領域の注目トピックスと動向

## スピントロニクス

### ■注目しているトピックス・動向

- データ駆動型研究
- 反強磁性スピントロニクス
  - 反強磁性の $Mn_3Sn$ にスピン軌道トルクによる情報書き込み。**双極子による記録保持から多極子への展開**の可能性。
- 核スピンゼーベック効果
  - 熱流による核スピン流生成現象。核スピンの高エン트로ピー特性により、極低温域（100 mK）で増大する。**絶対温度4ケルビン以下の低温域で機能するパワーデバイス、熱センサ、冷却技術へと展開**が期待。
- 量子スピン液体
  - スピノンやトリプロンを示す物質群は磁気秩序がないために周囲の回路やデバイスに磁気的影響を与えず、かつ原理的には原子レベルまでダウンサイズ可能。
- スピンメカニクス
  - 表面弾性波を利用したオプトスピンメカニクス
  - スピンを回転の軸にそえる効果（バーネット効果）によるスピン制御
  - バーネット効果の直接観測技術の進展。**スピンによる回転の検出（ジャイロセンサー）への応用**が期待。
- スピン波コンピューティング
  - 新たな**確率的ビットの提案・実証。ブレインモルフィックコンピューティング**。
  - スピン非線形ゆらぎを光の偏光やスピン流の電気測定などに基づいて定量化

## パワー半導体材料・デバイス

### ■注目しているトピックス・動向

- （システム）SiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したパワエレ機器・システムが基礎研究から応用研究に移行した。**1.2kV SiCモジュールが容易に入手でき、1.7kV 300A SiCモジュールも市場投入された。新幹線N700SはSiCインバータを採用し、Si-IGBTインバータと比較して**55%の小型化、約600kgの軽量化**を実現した。
- （シリコン）**Siパワー半導体は大口径ウェハ量産技術開発により、低コスト化が進んでいる。これまでは200mm製造ラインが主流であったが、欧州のインフィニオンでは2021年に2つめの**300mmラインの操業**を開始した。中国では複数の300mmラインが建設中であり、日本でもようやく300mmラインの建設が決定した。
- （SiC）**SiCのウェハは直径150mmの製品が中心に販売されており、**200mmウェハの開発も進んでいる。ウェハからデバイスまでを一気通貫で開発・製造する企業が増えている。**コンピュータシミュレーションやAIを活用した機械学習を用いることで、**高品質結晶成長の条件最適化が急速に進展**している。電流駆動能力向上させるFin構造の採用、ドリフト層の抵抗を下げる**超接合（Super-Junction）構造開発**などが行われている。
- （GaN）**Siに比べて低オン抵抗、高速スイッチングが可能でキャパシタやインダクタの大幅な小型化が可能のため、2019年頃から**GaN横型パワーデバイス**は、**65W以上の大容量のUSB充電器に搭載された製品が登場**し急速に広まっている。GaN縦型パワーデバイスについては、米国Nexgen power systems社が2022年中のサンプル出荷予定。**GaN自立基板についても近年進展**が著しく、三菱ケミカル社は低圧アモノサーマル法を開発し、4インチのパイロット量産ラインを立ち上げ、商品化を進めている。
- （Ga2O3） $\beta$ -Ga2O3のバルク単結晶融液成長**に関しては、既存のチョコラルスキー（CZ）、Edge-defined Film-fed Growth（EFG）、ブリッジマン技術が着実に進展している。貴金属ルツボを使用しない新規結晶育成手法が北海道大学発ベンチャーC&Aから報告された。FLOSFIAは $\alpha$ -Ga2O3 SBDを用いたDC/DC降圧コンバーターを販売開始した。

# 次世代半導体関係の研究開発領域の注目トピックスと動向

## 微細加工・三次元集積

### ■注目しているトピックス・動向

- (EUV) 2020年と2021年にそれぞれ5nm世代と3 nm世代のロジックデバイスの量産が開始された。レジスト材料のLWR (line width roughness) の主要因はレジスト材料にあり、化学増幅系レジストでは酸発生材の不均一分布が LWR の主要因であることが明らかにされた。マスク開発では、光学系やマスク表面への炭素堆積を防止するため、真空中に水素ガスが導入されるが、高強度 EUV 露光環境下でのマスクの多層膜や吸収体、ペリクル、レジストが水素化されることの影響が懸念されている。
- (ナノインプリント) 半導体プロセスへの適用や光学素子開発への利用など実用化が進展している。EUVは光学デバイス量産向けの300mmウエハ用インプリント・リソグラフィ装置を市販した。キャノンナノテクノロジーズが日本のキャノンと共同で半導体用のナノインプリントステッパーの開発を続けている。モールド作製では、マルチビームの電子ビーム描画装置が実用化され、高速に描画できるようになった。
- (ALD, ALE) ALD関連での最近のトピックスとしては、Area-Selective ALD (AS-ALD) が継続的に注目を集めている。DRAM向けキャパシタ材料として多元系材料のALD成膜が必要になっている。セルフアライメントパターニングでは超高選択比加工が要求され、原子層エッチング (ALE) が有望な候補であり、近年では、熱的原子層エッチング (Thermal ALE) 技術の開発が活発化している。
- (3次元実装) 3次元化の流れとしてチップ外接型、回路積層、トランジスタ積層がある。チップ外接型は、今後の小型化を満たしたシステム化された半導体、および、半導体パッケージとしての中心的な位置を狙う活動がチップレットとして活性化している。回路積層は、TSVの要素技術の魅力や性能向上への期待があるが、ロジックへの適用については熱対策やコストを含めた適用製品 (アプリ) が見いだせていない。

# 国際比較

## 革新半導体デバイス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナノエレクトロニクス基礎研究は、若い世代の研究者が減ってきており、厳しい状況。</li> <li>・ 2次元デバイス関係では、高品質・大面積・位置選択成長、及び面内/面外ヘテロ成長に強み。</li> <li>・ 2.5次元物質科学による基礎物性開拓が進む。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ポスト5G情報通信システム基盤に対応した半導体デバイス・半導体製造装置に対する大型の研究投資が強化されつつある。米中と比較するとまだその規模が小さい。</li> <li>・ 2次元デバイス関係では、光、バイオセンサー応用が進む。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 国家安全保障と産業競争力の確保が基本的な価値観としている。</li> <li>・ 国家ナノテクノロジー・イニシアティブ(NNI)</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 半導体に関するすべてのサプライチェーンを自国に押さえるべく、研究開発投資を拡大。</li> <li>→CHIPS for America</li> <li>→American Foundries Act of 2020</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EUROPE 2020 (2010-2020年)</li> <li>・ クライオCMOSなどでは存在感がある。地道なデータの取得、高精度なモデリングで優位。</li> <li>・ imecが2次元トランジスタの開発を牽引。トランジスタ特性のばらつきも報告しており、集積化を目指した研究が進む。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Innovation for the future of Europe: Nanoelectronics beyond <b>2020</b>.</li> <li>・ AIなどを対象とした10年間のデジタル戦略</li> <li>・ Graphene flagship 10年継続</li> </ul>
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 国家中長期科学技術発展計画要綱 (2006-2020年)</li> <li>・ 国家イノベーション駆動発展戦略綱要 (2016-2030年)</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 米国に対応するため、巨額な半導体関連投資が行われている。</li> <li>・ 半導体ファンド「国家集成电路産業投資基金」</li> <li>・ 大躍進政策</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 半導体素材・部品に関する自国生産強化にむけ、大型の研究投資が行われている。</li> <li>・ 「素材・部品・装備2.0戦略」</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人工知能 (AI) 半導体産業の発展戦略。</li> </ul>
台湾	基礎研究			
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 世界No.1の先端半導体工場、TSMCを中心に、巨額な半導体関連投資が行われている。</li> <li>・ 「高科技研发中心－領航企業研発深耕計画」</li> </ul>



# 国際比較

## 脳型コンピューティングデバイス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>デバイス開発は、東北大を中心にスピントロニクスデバイスの開発が継続的に進んでいる。回路開発は、東大、九工大のグループが中心となって研究を進めている。</li> <li>高イオン伝導性新材料を用いたAIデバイス動作実証などの研究発表が継続的に行われている。</li> <li>物理系1/μゆらぎの知見、位相同期現象の数理など非線形ダイナミクス研究の重要な基盤を築いており、世界的にも認知されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>NM Core(PFN)、回路構成モデル(東工大)、MRAM実用研究(東北大等)、半導体工研研(IGZO/FET)での開発での貢献あるも世界的には動きは小さい。</li> <li>集積化メモリスティブデバイスの研究成果発表件数が減少傾向にあるが、メモリスティブデバイスを用いたニューラルネットワーク研究に関しては優れた成果発表がある。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>回路開発に関して、Stanford大が中心となって、Braindropチップの開発が進んでいる。</li> <li>サンディア、アルゴンヌ、ローレンス国立研究所等と全国的に脳科学・ニューロモルフィックの基礎研究の裾野は広い。</li> <li>Intel社(Loihi2)がニューロモルフィック工学を推進、INRC活動で世界の活動を牽引している。</li> <li>新材料メモリスティブデバイスの研究開発、集積化メモリスティブデバイスを用いた新しいアーキテクチャの研究開発等が盛ん。</li> <li>1980年代より自然界や生物を中心とした非線形現象・機能の発見と理解に大きな役割を果たし、現在もその基盤がある。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intel社がLoihiチップの開発を継続している</li> <li>Google社(TPU45)/Cerebras社(WSE2)等で応用研究がなされている。</li> <li>s-CIMではプリンストン・ミシガン大学(s-CIM)、アリゾナ大学、GaTech社、スタンフォード大学(nv-CIM)、Mythic社(NORフラッシュ)他、さらにチップ応用ではBrainChip社等極めて活発である。</li> <li>メモリスティブデバイス応用を進めるスタートアップが創業され、活動を続けている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドイツ、スイス、イギリスのグループがそれぞれシリコン神経ネットワークチップの後継版を開発中。</li> <li>HBP(独・英)、チューリッヒ大学(+仏・伊)の2極を中心とした基礎研究を行っており極めて活発である。</li> <li>メモリスティブデバイスの信頼性向上など、基礎研究と応用研究・開発をつなぐ研究開発が活発に進められている。</li> <li>1980年代当初より確率共鳴や雑音誘起遷移などの非線形ダイナミクス、確率ダイナミクスの理論研究が非常に強い。</li> <li>Neuromorphic Computingのロードマップが欧州中に作成されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>IMEC/KU-Leuven、IBM社(PCM)、GreenWave社(MRAM)による実用化の研究活動、Graphcore社(英)/ST社(仏)、GAP9社(仏)/DYNAP社(ス)による製品化開発など幅広く行っている。</li> <li>産学コンソーシアムが機能し、AIチップのテーブアウト等がリリースされている。</li> <li>自然・生物系非線形現象を電子デバイスやナノデバイスで発現させる例が多い(スウェーデン、独、蘭)。物理リザパー計算系を化学、固体材料それぞれの特徴を利用して実装する(蘭、ポーランド)。EU国内間で連携し基礎と応用をうまく分業している。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>ニューロモルフィック領域でチューリッヒ大学と共同研究を行っている。CASもこの地域との結びつきが強い</li> <li>メモリスタ関連の研究発表が極めて多い。</li> <li>AIにかかわらず自然・生物系非線形現象に関わるテーマを広く扱っており、定常的に続けられている。数理モデルやシミュレーションベースの研究が多い。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>アリババ社(クラウド)、Hi-Sense社(モバイル)や、北京大/清華大/CAS/他全国的にAIアクセラレータ応用研究活動は全方位的に極めて活発になっている。</li> <li>フラッグシップ国際会議での発表件数が増えており、メモリスティブデバイスの不揮発性メモリ応用に関する研究成果発表も増えている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ニューロモルフィック領域での活動は見えていない</li> <li>メモリスティブデバイスの不揮発性メモリ応用に関する学術的成果の発表は継続的に行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>KAIST、Samsung社でのAIアクセラレータ関連の応用研究は極めて活発で貢献も大きい。モバイル応用よりである。</li> <li>一時期、Samsung社からの発表件数が減っていたが、CIMの研究開発が盛んになってきたここ数年においては、以前と同様の発表件数になっている。</li> <li>自然現象・生物機能デバイスの観点ではアクティビティがほとんどないものの、DL型AIチップ研究開発に多くのリソースが割り振られている。政府の支援を受けてバックエンドでNeuromorphicデバイスを実装可能なCMOSプロセスが提供されている。</li> </ul>
台湾	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ニューロモルフィック領域での活動は見えていない。</li> <li>メモリスティブデバイスの不揮発性メモリ応用に関しては台湾、インド、シンガポールなどからの発表件数が増えている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>国立清華大、交通大、TSMC社、Macronix社等でのSRAM/揮発性アクセラレータ/IP関連の応用研究は極めて活発で貢献も大きい。</li> </ul>



# 国際比較

## フォトニクス材料・デバイス・集積技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>東大、東工大、NTTを中心にシリコンと化合物半導体や磁性材料等の接合技術、京大、横国大を中心にフォトニック結晶を用いた高性能光デバイス等の研究開発で世界をリードしている。</li> <li>コンピューティング応用はNTT、東大などで進んでいるが、全体にプレイヤーが少ない。</li> <li>光物性研究も盛んである。トポロジカルフォトニクス分野の研究も近年増加している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>フォトニック結晶レーザやNEDOプロジェクトで開発された光I/Oコアなど、いくつかの成功事例が見られる。</li> <li>THz関係は、情報通信技術への応用を意識した研究展開が期待される。</li> <li>PETRA等の産学共同の研究プロジェクトも比較的初期から走っており、光電融合技術、ナノフォトニクス技術を利用した実用化が進んでいる。</li> <li>欧米や中国において多額の投資を受けたベンチャーの開発状況と比べると遅れを取り始めている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>MIT,UCSB等の大学を中心に幅広い研究が行われており、集積化やデバイス関連では圧倒的に世界をリードしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の関連ベンチャー企業が現れ成長しており、資金と人的リソースの双方で好循環が生まれ始めている。</li> <li>AIM Photonicsで他国に先じたシリコンフォトニクスのエコシステムが構築されている。IBM、Intel、Ayar Labsでは本格的な光電融合集積に向けた研究開発が行われている。</li> <li>CISCO,等が光トランシーバを販売中で、Intelも製品リリースを発表している。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ベルギーのGhent大,IMEC、英国のSouthampton大、フランスのLETI等を中心に幅広い研究が行われており、フォトニクス全般で基礎研究が着実に進められている。</li> <li>Imperial College等でメタマテリアル、プラズモニクス関連の純粋基礎研究に関しては伝統的に強く、理論研究者が指導的な立場を果たしている。</li> <li>ナノチューブ分野ではドイツを中心に基礎物性研究が強い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>IMEC、Eindhoven工科大、CNRS/LETI等にナノファブリケーションの技術が結集され、シリコンフォトニクスと化合物半導体ナノフォトニクスの融合をベースとしたデバイス応用研究、ナノフォトニクスを支えるファウンドリとして重要な役割を果たしている。</li> <li>Horizon2020の中で総額20M€程度がシリコンフォトニクス関係であり、TERABOARD、ICT-STREAMS等、ボードレベル、システムレベルの実用化を意識したものが多い。</li> <li>プロジェクトの支援もあり、コンピューティング応用の研究者も日本に比べて非常に多い。</li> <li>超伝導検出器やファイバーレーザーなど研究用途の装置は欧州製が多く、ほとんどは大学からのスピノフによる。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>フォトニクス材料やメタ表面、トポロジカルフォトニクスなどの分野で多くの質の高い基礎研究が報告されるようになった。</li> <li>LNOIでは米国と並んで重要な拠点となっている。</li> <li>拠点大学には最先端の加工技術装置が導入されており、作製技術も急速に立ち上がりつつある。</li> <li>2次元物質を用いたナノフォトニクスや、トポロジカルフォトニクスなどの新しい分野で、世界を牽引する成果を出している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>光量子技術を中心に顕著な成果を出しており、今後のBeyond 5G/6G関連分野でも活発な技術開発が予想される。</li> <li>集積化については他国に遅れをとっている。</li> <li>国からも応用を目指した研究に多額の資金援助が行われている。特にクリーンルームや製造設備に関しては、最新の設備が導入されて進展が目覚ましい。</li> <li>SMICにシリコンフォトニクス用の製造ラインを構築している。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)では古くからシリコンフォトニクスの基礎研究が行われているが、目立つ成果や産業化に繋がるような成果は見られない。</li> <li>メタマテリアルの一部の分野を除き近年若干陰りが見えるように見える。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>SamsungがCPUとメモリ間をシリコンフォトニクスで繋ぐ開発を行っているが、全体として目立つ成果・取り組みは見られない</li> </ul>

# 国際比較

## IoTセンシングデバイス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>MEMS関係の主要国際会議での論文数は多いが、多くの大学研究者の興味はMEMSデバイスの高性能化、低消費電力化、高集積化といった研究開発のメインストリームや産業技術から離れつつある。若手研究者の層は比較的厚いが、彼らがメインストリームや産業技術を習得できる機会は少ない。また、企業からの基礎的な研究報告が少なくなっている。</li> <li>集積センサ技術開発で、NIMS(MEMS+感応膜)、豊橋技術大学(CMOS+感応膜)、東京大学(シリコンデバイス+金属ナノ構造、堅牢な分子識別界面 +集積化センサ)、慶應大学(堅牢なセンサ回路設計)などの活動が活発になっている。</li> <li>イメージセンサ技術においてはアカデミアにおいても静岡大学や東北大学など、メーカーに劣らぬ高いレベルの技術を提言できるグループが存在する。</li> <li>Q-LEAPの中で、量子センサ関係の研究が行われている。また、JSTさきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」が発足し、一部のテーマでNV中心を用いた研究が進められている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本のデバイス・モジュールメーカーの実力は高く、弾性波フィルタ、自動車用慣性センサなど強みがあるが、デバイス化・製品化に向けた研究開発が低調。</li> <li>I-PEX、パナソニック、レボーン、コスモス電機、コニカミノルタ、太陽誘電などの企業で、集積センサ、匂いセンサなどの研究開発を進めている。</li> <li>イメージセンサ製造技術においてソニーが世界トップを走っている。機能性においてもAI搭載センサや偏光イメージセンサなど高度化したセンサを実現しており、優位性は製造技術にとどまらない。LiDAR関連技術においては自動車メーカーのけん引力もある。</li> <li>Q-LEAP量子計測・センシング技術領域では、脳磁計などの医療応用や電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発が行われている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究者の層が厚く、研究開発のスペクトルは広く、新しい発想は米国から出てくることが多い。実力のある有名大学、Stanford大学、カリフォルニア大学Berkeley校/Davis校/Irvine校、ミシガン大学、Georgia工科大学などは、MEMSデバイス研究のメインストリームやベンチャー起業でも実力を見せている。</li> <li>BERKELEY SENSOR &amp; ACTUATOR CENTER など、多くの大学で応用を意識した基礎研究がなされている。</li> <li>イメージセンサ、化学センサをはじめとする各種センサ技術への研究意欲とスペクトルの広さは依然として旺盛である。</li> <li>ハーバード大学を中心に、NV中心の磁場計測や、ナノ粒子による温度計測の実証研究など、研究が活発に行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>InvenSense、SiTimeなどに続く成功しそうなベンチャー企業が次々と現れている。シリコンバレーでは、この分野への投資熱も高い。</li> <li>On Semiconductor社(Aptina社買収)、OmniVision社、STMicroelectronics社など、複数のメーカーが光学センサの高い技術力を備え、IoT向けセンサなどミドルレンジセンサに関して層が厚い。またapple社、Microsoft社やintel社などの3Dイメージング技術の有カユーザーも存在する。</li> <li>ハーバード大学を中心に、神経電流のDC磁場の計測など、NV中心のスピンをプローブとしたイメージング技術開発が進められている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>欧州では応用研究志向が強く、基礎研究と応用研究は一体的に進められている。・化学センサの基本的な検討だけでなく、集積回路と一体化の検討に関しては米国以上に活発になっている。</li> <li>EPFLやIMECなどがイメージセンサ技術研究において存在感を維持している。</li> <li>単一ダイヤモンドNV中心の光検出磁気共鳴(ODMR)が1997年に初めてドイツから報告されて以来、ドイツを中心に先駆的な研究がなされている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robert BoschのMEMSセンサでの地位はゆるぎない。その王者たる技術力は簡単に追いつけるものではない。同社は社内でも活発な研究開発を行いつつ、シリコンバレーやフ라운ホーファー研究機構とも共同研究を積極的に行っている。</li> <li>STMicroelectronicsはMEMSについて全方位の研究開発を実施しており、ベンチャー企業との繋がりも深く、新しいデバイス開発に積極的である。</li> <li>フランスのLeti、ドイツのフ라운ホーファー研究機構などは、世界的に強力な研究機関であり、ベンチャー起業も比較的盛んである。</li> <li>集積化学センサ関係では、Sensirion社(スイス)が金属酸化物アレイセンサを商用化し、JLM Innovation社(ドイツ)がTechnion(イスラエル)と共同で呼吸器がんを検知するSniffphone(20種のセンサアレイ利用)を開発している。</li> <li>MetaboliQs、ASTERIQSのプロジェクトでダイヤモンドNVセンサを用いた磁気センサ、電池評価センサ、小型NMRなどの開発を進めている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要国際会議で中国の占める論文シェアがもっとも高く、1/3程度に達することもあり、最近、研究の質量とも急伸びしている。</li> <li>集積化学センサでは、北京大学で多種多様なナノ材料を用いた揮発性化合物センシングを行っている。呼気中のウイルス等の検出にも成功している。</li> <li>中国科学技術大学、香港中文大学から、NV中心を用いた磁場計測やたんばくのスピントロニクスに関する研究が進められている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>MEMSやセンサの国産化の政府方針のもと巨額投資が行われている。多くの新興企業が登場し、科创板(中国版NASDAQ)に上場する企業も現れている。</li> <li>現時点では、中国企業は技術とシェアで欧米企業に及ばないが、マイクロフォンと赤外線センサでは存在感を高めている。</li> <li>SMEC社、Silex社北京拠点、CR Micro社など、MEMSファウンドリが充実してきた。IoTセンサに関する研究開発センターが作られている。</li> <li>多数のメーカーが安価なグルコースセンサを製造するなど、ミドルレンジ以下のエレクトロニクスについてはあらゆる分野で極めて競争力が高い。</li> <li>イメージセンサにおいても、他の半導体分野同様、西側諸国からの制裁を受けながらも進歩を進めている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>かつてセンサ・MEMSの研究で上位に位置していたが、実用化の成功例に乏しいため、産業界や政府からの投資熱が冷めている。その結果、分野に研究資金が行き渡らず、研究者層が薄くなっている。</li> <li>KAIST:Center for Integrated Smart Sensorsを設立し、集積化センサのR&amp;Dを精力的に進めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>財閥系IT企業は、スマートフォン等に搭載するセンサ・MEMSをグループ内で調達するべく、研究開発を行ってきたが、技術的蓄積と高度人材が不足しており、成功例に乏しい。</li> <li>サムスンがイメージセンサ製造技術においてソニーと並ぶ世界トップレベルの技術を有している。</li> </ul>

# 国際比較

## スピントロニクス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>JST戦略的創造研究推進事業などを中心に基礎研究が継続的に行われている。</li> <li>トポロジカルスピントロニクス、核スピントロニクス、スピンメカニクスなどの新しい概念に基づく研究開発が成果を上げ始めている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の企業がMRAMの生産を開始した。企業のより一層の寄与が必要である。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>NSF、DOE、DOE傘下のNERSC、ONRからの手厚い支援のもと、良質な基礎研究成果を出し続けている。とりわけ、二次元物質を利用した新規スピントロニクス機能の開拓が盛んに進められている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>キャッチアップが早く、電圧トルクなど多くの応用研究が始まっている。Everspin、Global-Foundries、IntelがMRAMの量産体制を準備しつつある。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>フランス、ドイツ、イギリス、オランダ等を中心に良質なスピントロニクスの基礎研究が展開されており、スピン波を利用した計算処理技術などの基礎開拓が進んでいる。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>グラフェン・フラッグシップの活動を支援する欧州委員会の資金援助により、二次元物質を利用したMRAM素子の開発に向けた研究が行われている。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子異常ホール効果の実証など、質の高い研究が行われるようになってきている。</li> <li>潤沢な研究資金と最新機器を活用し、米国・欧州帰りの研究者が活発に研究を行っており、高いポテンシャルを有する。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>応用研究に関する情報はそれほどないが、基礎研究の質が高くなっており今後国家的事業として一気にアクティビティが高まる可能性がある。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまで理論中心だったが、界面DMIの研究などの実験においても良質な研究がみられるようになってきている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>SamsungがMRAMの量産体制を準備している。</li> <li>財閥系企業などからの潤沢な資金をもとに応用研究・開発を活発に行う可能性がある。</li> </ul>
その他	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>シンガポールのA*STARがスピントロニクス研究に力を入れている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>台湾の大手ファウンドリーがMRAMの量産体制を整備した。</li> </ul>

# 国際比較

## パワー半導体材料・デバイス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>SiC国際会議 (ICSCRM/ECSCRM)、パワーデバイス国際会議 (ISPSD) をはじめ、基礎研究に関する発表件数、評価の高い論文は多い。</li> <li>GaN-HEMT (横型) を使用したパワエレ機器・システムの基礎研究を行っている日本の大学は限られている。一方、GaN縦型パワーデバイスに関しては文科省プロジェクトや環境省プロジェクトでさまざまな成果がでている。</li> <li>バルク・薄膜結晶成長、物性基礎研究などの材料研究、およびデバイス基盤技術開発が着実な進展を見せている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロームをはじめ三菱電機、富士電機、日立製作所、東芝などでデバイス・モジュールの量産及びそれを使ったシステム開発が行われている。</li> <li>企業を中心にSiC-MOSFET/SBDモジュールの応用が進展している。</li> <li>GaN基板について、HVPE技術の洗練、Naフラックス技術、アモノサーマル技術などの開発が進んでいる。</li> <li>GaN横型パワーデバイスについては、日本のメーカーの撤退があったが、東芝がGaN-on-Si事業を再開した。</li> <li>世界で唯一、ベンチャー企業 (ノベルクリスタルテクノロジー) が、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>バルク・およびエビ基板の製造販売をしている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>大学や軍関係の研究所、Wolfspeedなどの会社やコンソーシアムで、レベルの高い基礎研究に取り組んでいる。</li> <li>一部の研究拠点大学で10kV以上の高耐压SiC-MOSFET/SBDモジュールを使用したパワエレ機器の基礎研究を行っている。</li> <li>GaN-HEMT (横型) を使用した機器・システムの基礎研究を行っている大学は増加している。</li> <li>Ultrawide bandgap 半導体への注目の高まり、およびそれに伴う新規研究ファンドのスタート等につなげられる形で、その研究開発人口は多い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>産業用から軍事応用まで、幅広く研究開発がなされている。特に超高耐压デバイスは、軍関係のサポートにより進んでいる。PowerAmericaやFREEDMといったコンソーシアムが中心的な役割を果たしている。</li> <li>SiC-MOSFET/SBDモジュールの応用研究・開発は、性能と小型・軽量化を優先した医療機器、さらに損失低減を重視した大容量太陽光発電などを対象に進められている。軍事産業を対象としたパワエレ機器・システムの研究も積極的に推進しているが、論文発表は限定的である。</li> <li>一部の米国企業はGaN-HEMTを使用したサーバー用電源を製品化し、応用は着実に進展している。</li> <li>Nexgen power systemsは縦型GaNパワーデバイスを用いたモジュール、ACアダプターの商品化段階にある。</li> <li>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスは、基盤技術開発の段階にある。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の研究拠点大学ではパワエレ機器・システムの研究を活発に行っている。</li> <li>大きな国プロは見当たらず、大学や国研のSiC研究者は次の材料 (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>など) に研究対象を変えている。</li> <li>企業との共同研究または企業研究所において、SiCの信頼性などに関する基礎研究は依然として深く行われている。</li> <li>GaNデバイスでは基礎研究のプロジェクトよりむしろ応用研究・開発に比重が移りつつある</li> <li>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスではドイツ ベルリン地区の大学・国研が一体となった材料・デバイス研究開発プロジェクト (GraFOx 2) が進められている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>STMicroはSiC MOSFETがTesla Model3に採用されて躍進しており、8インチウェハ製造やチップ工場の拡張などを進めている。</li> <li>GaN-HEMT (横型) の応用研究は着実に進展しており、GaN-on-Si横型パワーデバイスに関してInfineonなど企業の製品化が進んでいる。</li> <li>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスは、基盤技術開発の段階にある。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>学会・論文発表件数は増加している。デバイス関連では、TCADによるデバイス特性解析や新規構造設計に関するものが目立つ。</li> <li>新規性はあまりないものが多いが、材料・デバイスの特性自体は優れたものも多い。</li> <li>パワーデバイス関連国際会議の中国開催も増えつつある。</li> <li>政府や地方自治体の補助により、国内でデバイス作製環境が整いつつある。</li> <li>GaN-on-Si横型パワーデバイスに関して多額の研究費が投入されており、GaN-on-GaNの研究も増えている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国中社 (鉄道) やEVメーカーなど、SiC採用を検討するユーザーが多数存在し、それらに向けて、ウェハからデバイス、モジュールまで全方位での研究開発が行われている。</li> <li>HVPE法によるGaNウェハメーカーが健闘している。</li> <li>GaN-on-Si横型パワーデバイスを利用した製品 (PC用ACアダプター) の企業が多数でている。チップメーカーと連携し着実に技術を高度化させている。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>KERIを中心にデバイス開発が行われているが、学会発表や論文数に大きな増加は見られず、目立った動きはない。</li> <li>GaN HEMTパワーデバイスを研究しているグループがあるが、活動は限定的である。</li> <li>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>パワーデバイス開発の国プロがスタートしているが、まだ新規的なものではない。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>SK SiltronによるDuPont社のSiCウェハ事業の買収や、Onsemi社の富川工場でSiCデバイス生産など、ウェハ・デバイスの製造が増えている。</li> <li>産業界でのGaNパワーデバイスについての積極的な動きは見られない。</li> </ul>



# 国際比較

## 微細加工・三次元集積

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EUVリソグラフィの基礎研究では兵庫県立大学で光学系、レジスト、マスク等の基盤技術開発の基礎研究が精力的に進められている。</li> <li>・ ナノインプリント技術に関して、大阪府立大学、東北大学、産業技術総合研究所などで各種基礎検討を続けている。極限ナノ造形・構造物性研究会ではシングルナノ領域のナノインプリントに取り組んでいる。</li> <li>・ ALD技術における日本の存在感は低下傾向である。国内の大学では東大等が検討していたが、近年では発表件数も低下している。ALE技術は、名古屋大（ALEプロセス）、大阪大（表面反応）が、国内の研究拠点となっており、精力的に研究を行っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EUV用光源開発では EUVマスク欠陥検査装置用に開発が進められている。また、日本国内メーカーがベリクルの開発を進めている。</li> <li>・ ナノインプリント技術については、東芝メモリ、キヤノン、大日本印刷がNANDフラッシュメモリの生産に向けて精力的に研究開発を行っている。</li> <li>・ ALDでは、東京エレクトロン社、日立国際社が、High-k等を含む金属材料の熱ALD技術で世界的なシェアを持っている。ALEでは、東京エレクトロン社が異方性ALE（絶縁膜）の量産化を世界に先駆けて実現した。日立ハイテック社も等方的Thermal ALE技術のデバイス適応を世界に先駆けて検討している。</li> <li>・ 材料メーカー主体の活動（JOINT2、フレキシブル3D実装協働研究所など）がみられる。ただし、牽引役の半導体メーカーが不在。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EUVリソグラフィに関しては無機材料を中心としたレジスト材料の開発と、そのメカニズム解析が、材料メーカーだけでなく、大学や研究機関によって積極的に進められている。</li> <li>・ ナノインプリント技術は、プリンストン大、ミシガン大、テキサス大、マサチューセッツ大で精力的に研究されている。</li> <li>・ AS-ALDや、Thermal ALEではコロラド大やスタンフォード大など、大学が先駆的な発表を継続的に発表している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EUVリソグラフィの実用化が着実に進んでいる。</li> <li>・ ナノインプリント技術はキヤノンテクノロジーズ社が引き続き米国を拠点として精力的に研究開発を進めている。ロールtoロールの研究もある。</li> <li>・ Intel社の先端ロジックデバイスでは、ALEやThermal ALE技術がFin FETの製造で用いられている。Thermal ALEは日立ハイテック社の技術である。</li> <li>・ intelを中心としたチップレット規格化が進められている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EUVリソグラフィについては、スイスのPSIにおける放射光を用いた干渉露光や、Carl Zeiss SMTでの高NA化開発等、微細化の最前線を牽引している。材料面でもMulti Triger型など提案している。</li> <li>・ ナノインプリント技術はWuppertal大、PSI、Letiなどで研究しているが、NaPaNILの後は大きなプロジェクトは走っていない。</li> <li>・ アイントホーヘン工科大は、ALD・ALE共に、大学としては最も進んだ研究開発を行っており、大学研究の中心的な役割の一つを担っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ベルギーのimecにおける微細加工技術、オランダのASMLの露光装置開発が、半導体の微細化技術の中心として君臨している。EUVリソグラフィ、マルチビーム型描画装置や検査装置なども積極的に研究開発を進めている。</li> <li>・ ナノインプリントについてはEVGおよびLetiがウエハ括ナノインプリントの実用化に力を入れている。</li> <li>・ imecがALD・ALEに関連する世界で唯一のコンソーシアムの開発拠点となっており、特にAS-ALD技術で、先駆的な検討を行っている。また、オランダのASM社はプラズマALD技術において最先端の技術を有している。英国のOxford Instruments社は、研究用途のALD装置を多く製造し、ALDの研究で幅広く使用されている。</li> <li>・ 3D実装もimec、Fraunhofer IZMによる技術研究が継続されている。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 欧米や日本を追い越す状況に変わりはないが、大学からの研究発表がみられるようになってきている。</li> <li>・ 2018年からナノインプリント技術の研究開発がブームを迎えており、2019年には論文発表件数で世界トップに躍り出た。香港大学、南方科技大学、天津大学、中国科学院、大連理工大学、南京大學、厦門大学などから多くの発表がなされている。</li> <li>・ ALD・ALE関係はALD Conferenceでの発表件数から見ても、まだ件数は少ない状況である。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各種加工技術関連開発、プロセス技術開発、材料開発が積極的に進められており、発表文献数にも伸びがみられる。</li> <li>・ ALD・ALE関係での中国企業の発表は、ほとんどみられていない。しかし、微細加工技術に関する研究開発を積極的に進めている。</li> <li>・ RISC-V展開の状況もあり、中国製半導体の流通は増加。ファウンドリ保有の強みもある。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Hanyan大学でEUV用ベリクル膜の研究が進められているが、基礎研究のレベルはそれほど高くない。EUV用位相シフトマスクの研究開発が進められている。</li> <li>・ ナノインプリント技術ではKIMMとKorea大が基礎研究を行っている。</li> <li>・ ALD最大の学会であるALD Conferenceにおいて、非常に多くの発表があり、各種研究機関、大学での研究開発が極めて活発に行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Samsung社が微細加工技術の最先端技術をリードしている。</li> <li>・ SK Hynix社が東芝メモリ社とナノインプリントの共同研究を行っている。</li> </ul>
台湾	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ リソグラフィ技術の先端的研究の一部は台湾放射光施設で進められているが、活発に進められている状況ではない。</li> <li>・ ALD Conferenceでの発表件数が比較的多い国であり、特にALD関連の発表が多い。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ TSMC社は世界のファウンドリのトップ企業であり、半導体製造の量産技術で微細化のトレンドを牽引している。</li> </ul>