

省資源・省エネ・超低設備コストを実現した 超小型デバイス製造システム—ミニマルファブ

Minimal Fab - Ultra-small Device Production System
saving energy, resources, and facility cost

国立研究開発法人産業技術総合研究所 ミニマルシステムグループ
Minimal System Group, AIST

首席研究員、ミニマルシステムグループ長 **原 史朗**
Shiro Hara (Principal Research Scientist, group leader of minimal system group)

主任研究員 **クンプアン ソマワン**
Sommawan Khumpuang (Senior Researcher)

主任研究員 **前川 仁**
Hitoshi Maekawa (Senior Researcher)

上級主任研究員 **池田 伸一**
Shinichi Ikeda (Chief Senior Researcher)

主任研究員 **石田 夕起**
Yuuki Ishida (Senior Researcher)

客員研究員 **久保内 講一**
Kouichi Kubouchi (Visiting Researcher)



キーワード

ミニマルファブ, 多品種少量, 省エネ・省資源

01 | はじめに

現在の電子デバイス工場は、時間当たりの生産量を追求した結果、ウェーハ直径が300mmに拡大し、工場1ラインの設備投資額は1兆円規模になりつつある。1兆円の設備投資を回収するには、年間に3,000億円は利益が出なくてはならないため、売上は少なくとも1ライン当たり1兆円が要求されることになる。この300mmラインでは、1cm²の大型チップ換算で5億チップ生産できるが、そのような超大量注文をする顧客はいないので、それを一つのデバイス種で埋めることはありえない。そのために、多品種を同時に生産しているのが実態であり、その分、段取り替えなどに手間取るために、生産性が大きく低下するという問題が生じている。さらに、全世界的に見て、メガファブの全生産能力に対して、顧客の受注はほぼ1/10程度と見積もられる(たとえば、1年間にCPUは約3億個生産されており、300mm1ラインで世界の需要を賄える。筆者らの調査ではその300mmファブが全世界に123ラインも存在する。)

このために、少ない顧客を争って敗れた多くのデバイスメーカーが廃業に追い込まれている。我々の多くの顧客へのヒアリングでも、実際の顧客のオーダー数は、多くが1万個程度ということが判明している(白物家電製品、カーエレクトロニクス、産業用機械などで使用する個々のデバイスのオーダー数を、多くの企業にヒアリングした独自調査結果に基づく。)

この巨大投資の問題を解決する、顧客の1万個以下のオーダー数に適した生産システムがミニマルファブ(図1)である^{1),2)}。メガファブが本来受注すべき1,000万個単位の受注に対して、1万個以下の少量オーダーに対応するため、ミニマルファブの生産システムの規模と生産能力をメガファブの1/1,000に設定した。これによりファブの設備投資も1/1,000となる。ミニマル



図1 デバイス関連のイベント、
セミコンジャパン2016の会場に配置したミニマル装置群



図2 ミニマルシャトル(左の赤い容器)とハーフィンチウェーハ

ファブが実現すると、ユーザーの求めに応じて1個ずつデバイスを製造することができるようになる。その実現へ向けて、我々はミニマルファブに適した製造装置群の開発体制を構築し、およそ7年前から装置群の開発に着手し、既に前工程装置群の主

要部装置17種を実用化することに成功した。ミニマルファブでは、図2に示すように、ウェーハを最終ユーザーが使うのに十分なサイズであるハーフインチを用い、プロセス装置を幅約30cmに規格化した。それに加えて、半導体工場の設備投資と運転コストを抑えるため、クリーンルームを不要とする局所クリーン化技術を開発して装置群に導入した。本稿では、ミニマルファブの概略を述べると共に、省エネ、省資源の観点についても言及する。

02 | ミニマル規格と特徴

多品種少量生産とそのビジネスで問題となることは、大量生産ではないためにそのままでは大変非効率なものであるということである。この問題を克服するには、多品種システムを極力共通化や標準化することで効率的なものにすることが重要である。ミニマルファブでは装置開発企業だけでも約30社あるが、この多くの企業の扱うウェーハサイズ、ウェーハの搬送系、装置の外形、ユーティリティの装置内部への組み入れ、それに装置タッチパネル操作の総合的なシステム体系などの包括的な仕様を世界で初めて完全に共通化して統一した。このことで、装置開発とデバイスプロセス開発が極めて効率

的になった。ミニマル規格を満たす製品だけにミニマルファブ認証を与える仕組みも構築している。洗浄装置、露光装置、CVD(Chemical Vapor Deposition)装置、エッチング装置、イオン注入装置等は、元来全く機能が異なり本来サイズの異なる装置群である。それらを幅294mm、奥行450mm、高さ1440mmの人サイズの外形に統一した(図3)。

ユーティリティは、装置入力として、AC100Vの商用コンセント、圧縮空気および圧縮窒素の、これら3つだけとした。出力は装置内で処理された清浄な排気だけである。

搬送系を統一したことで、300mmシステムでは特にコストアップの原因となっているロボット搬送系のバグ(プログラムの不具合)がほとんど無くなった。装置メーカーは搬送系の開発とバグ取りコストから解放され、自ら得意とするプロセス装置の主要部の開発に注力できている。このことは、数十の装置開発をゼロから同時に始めたミニマルファブ全体の開発が実用化へと着実に進んできた大きな理由である。

また、従来のメガファブでは、装置が巨大なため、装置の並べ替えができず、薬液とガスの供給・廃棄処理に巨大な別建屋が必要であった。ミニマルファブでは装置が人サイズなので、原料と排出物が極めて少量で装置内に装填できる。このため、装置が移動でき、レシピの順番通りに並べ替えることができるようになった。

ウェーハ搬送系は、クリーンルームを不要とする局所クリーン化搬送系を開発して統一した。このため、装置の周辺環境はクリーンルームである必要はない。装置間のウェーハ搬送には、ミニマルシャトルと命名した密閉搬送器(図2)を用いる。シャトルと装置のドッキング時に、ウェーハが装置外部環境に触れないように密閉ドッキングを行う。ドッキングを行う装置前室を、PLAD(Particle Lock Air-tight Docking system)と呼ぶ(図4)。この密閉ドッキングは、過去半導体システムでは実現できていなかった極めて高度な技術である。PLADシステムを用いることで、既存のスーパークリーンルームと同等以上の清浄化性能を達成した³⁾。



図3 人サイズのミニマル装置(注:1プロセス1装置)

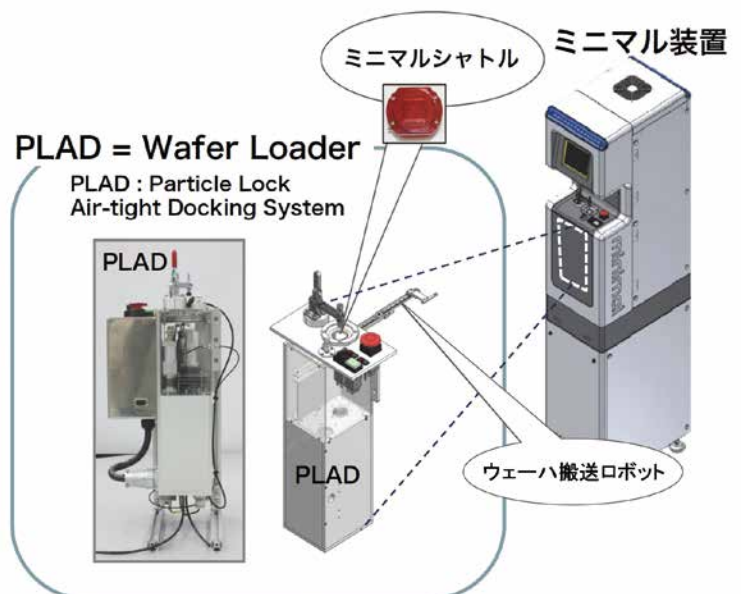


図4 微粒子とガス分子を同時に外界から遮断する局所クリーン化ウェーハローディングシステム PLAD (Particle Lock Air-tight Docking)

表1 ミニマルファブとメガファブのエネルギー消費量比較

工場	メガファブ		ミニマルファブ	
	A工場	B工場	量産モデル	実動試作ファブ@産総研(現在)
製造品目	メモリ	先端ロジックLSI	多品種少量 (0.1μm)	多品種少量 (1μm)
クリーンルーム面積(m ²)	34,500	32,000	クリーンルームレス 400	クリーンルームレス 73
ライン能力比(ミニマルのウェーハ面積を1)	653	452	1	0.01
消費電力(GWh/年)	398	328	0.46	0.025
原油換算量(kliter/年)*1	100,300	82,656	116	6
電気料金(億円/年)	46	38	0.053	0.0029
クリーンルーム単位面積当たり消費電力(MWh/年・m ²)	11.6	10.3	1.15	0.34
ウェーハ当たり消費電力(kWh/枚)	829 (300mm)	781 (300mm)	0.96 (12.5mm)	5 (12.5mm)
ウェーハ単位面積当たり消費電力(kWh/cm ²)	1.17	1.10	0.78	4.1

*1:原油換算係数(2016年):0.252kliter/MWhとした

03 | ミニマルファブの省エネ性能

ミニマルファブとメガファブのエネルギー消費量の比較を表1に示す。メガファブでは数百GWh/年という莫大な電力を使用するが、ミニマルファブでは、フル稼働を想定しても、0.5GWh/年しか使わない。

現在つくばに設置されて稼働している試作向けミニマルファブ(29台/73m²)では、ウェーハを年間5,000枚ほど消費しているが、装置電力、給排気、エアコン、照明の使用電力はそれぞれ年間4.8MWh, 7.8MWh, 1.7MWh, 10.5MWh (合計0.025GWh)であり、これらを合わせても僅か年29万円(大口顧客レート換算)で済んでしまっている。このように極めて省エネで済む主な理由は次の通りである。まず、従来クリーンルーム(3~4万m²)で200GWh程度消費していたクリーンルーム電力が、ミニマルファブではクリーンルームを使わないため、0.01GWh程度しか使わず、普通のオフィスレベルの電力消費であるため、1万分の1程度になっている。次に、装置については、ミニマルファブでは装置サイズが非常に小さいため、その装置熱容量が極めて小さく、装置電力ON後すぐに熱的に安定するという優れた特徴がある。このため、装置を使い終わったらすぐに電源をシャットダウンするという既存工場では考えられない素早い使い方が可能であり、実際につくばのミニマルファブではそのように運営している。また、装置の物理的発熱量、すなわち装置の平均電力はそれぞれの装置で平均250Wである。「こまめに切る」、という一般家庭では当たり前のオペレーション方法との併用で、1つの部屋あたり、オフィス用のエアコン4台で間に合ってしまう。なお、空気は特別なクリーン化を施さず、単にプレフィルター程度を介して外気を取り込むため、フィルターコストがほとんどかからず、かつ、給排気コストも安上がりとなる。

表2 ミニマルファブの一工程当たりのコスト

プロセス	原料・材料・用具	1処理当たりのコスト(円)
ウェット洗浄 (RCA洗浄)	アンモニア (SC-1)	0.24
	H ₂ O ₂ (SC-1)	0.35
	塩酸 (SC-2)	0.21
	H ₂ O ₂ (SC-2)	0.31
	DHF	0.06
レジスト除去	H ₂ SO ₄	0.90
	H ₂ O ₂	1.00
酸化膜エッチャー	BHF	13.23
アルミエッチャー	混酸アルミ	0.01
レジスト塗布	レジスト	5.48
	リンス液	41.03
	HMDS (ビス(トリメチルシリル)アミン)	0.10
	シリンジ	2.64
	PTFEノズル	7.76
	ノズルキャップ	1.00
現像	現像液	1.08
	シリンジ	4.85
	PTFEノズル	9.70
	ノズルキャップ	1.25
SOD(リン)	リンドーブ液	121.50
	リンス液1(酢酸エチル)	2.46
	リンス液2(エタノール)	5.68
	シリンジ	1.65
	PTFEノズル	19.40
	ノズルキャップ	0.63
	リンドーブ液	12.15
SOD(ボロン)	リンス液(2-メトキシエタノール)	3.81
	シリンジ	1.65
	PTFEノズル	19.40
	ノズルキャップ	0.63
	酸化炉	O ₂ (1L型)
レーザ加熱炉	水素フォーミングガス	91.84
	O ₂ (10L型)	3.56
マイクロプラズマ	Ar (10L型)	0.86
	CF ₄ (7kg)	2.00
	SF ₆ (3kg)	8.17
	ターゲット	149.18
Alスパッタ	Ar (0.5L, 10気圧以下)	14.32

※ SC-1: RCA洗浄のStandard Clean 1処理 (アンモニア+過酸化水素水+水)
 ※ SC-2: RCA洗浄のStandard Clean 2処理 (塩酸+過酸化水素水+水)
 ※ SOD: Spin On Dielectrics. ここではドーピング用のボロンやリンを含んだシリカガラス微粒子が溶けている液体をウェーハ上にスピン塗布して、その後ウェーハ加熱によって、ボロンやリンをシリコン基板中に熱拡散させるドーピングの古典的方法。

04 | ミニマルファブの省資源性能

4-1 原材料使用量

既存最新の300mmウェーハに対して、ミニマルファブでは直径12.5mmのウェーハを用いるので、その面積は1/576である。このため、絶対的な薬液使用量は極めて少なくなる。300mmウェーハでは、作って一部しか用いない実例が非常に多く資源の無駄遣いをしていたという意味では、ミニマルファブの絶対的省資源性能は非常に優秀と言うことが出来る。ただ、ここで表2を見てみると、1回当たりのコストが100円程度でとても高くつくものがある。具体的には酸素ガス、SODドーピング液、それにスパッタターゲットである。酸素ガスは、高純度品で1Lの高圧ガスを用いると単価が非常に高くなってしまふ。また、SODドーピング液は、世間でほとんど使われていないために高価である。スパッタターゲットも小さなサイズの金属ディスクの製造費用が高くなっている。さらに問題なのは、薬液の消費期限が3ヶ月～6ヶ月と短くその間に使い切れないことである。たとえば、リンドーピング液は1回当たりごく微量しか使わないが、消費期限は3ヶ月である。その間に10%だけしか使えなければ、1回当たりの単価は非常に高価になり、かつ90%は廃棄せざるを得ないことである。このコストダウンと廃棄のムダは今後のミニマルファブの課題とも言える。今後はインクジェットプリンタのような消耗品のデリバリーで付加価値を付ける薬液供給・回収サービスビジネスを起こしてゆくべきであろう。

ただし、以上の課題があるにもかかわらず、たとえば、39工程(すなわち39回ミニマル装置を使うということ)で作成するMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor: MOS型電界効果トランジスタ)では、実績ベースで材料費合計3,274円、電気代34円であり、デバイス試作としては、破格的に安く済んでいる。

4-2 ウェット処理における薬液使用量

ミニマルファブだからと言ってそれだけで高効率になるわけではない。たとえば、洗浄プロセスでは、従来のメガシステムの枚葉洗浄では、1ウェーハ当たり1.2L/min.という薬液および超純水を使う。これを1/1,000にスケールダウンすると1.2ml/min.ということになる。ところが、普通にノズル洗浄をしようとすると、100ml/min.程度にしか節約できない。実際、開発初号機では、500ml/min.にしかならなかった。この問題に対して、我々はハーフィンチウェーハの強い表面張力を活用する方法～スピンドロップレット法を開発した。図5(a)は、ウェーハ上の液体に強い表面張力が働く様子を示している。このような小さいウェーハでは、薬液の高さが4mmにまで盛り上がって保持されている。このウェーハ上の薬液量は約0.3mlである。図5(b)

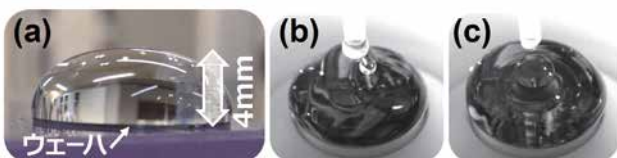


図5 ハーフィンチウェーハの強い表面張力を利用したスピンドロップレットシステム

では超純水をさらに滴下した所で、図5(c)ではその後も液体がこぼれない様子が見て取れる。この物理現象をそのまま使えば、薬液の追加供給無しで、ウェーハ上に保持している薬液だけでウェットプロセスが可能となる。薬液処理後は、高速回転で薬液を振り飛ばせば良い。表2のウェット処理で薬液コストが非常に低いのは、このスピンドロップレット法を用いたからである。

4-3 化学反応効率

また、省資源性について言及すべき事の一つは、化学反応効率である。ミニマルファブでは、装置内に原料ガスと除害設備を装填する仕様であるため、原料ガスの利用効率、すなわち根本的には化学反応効率を向上させることが有効である。たとえば、CVDプロセスでは、従来はキャリアガスの水素を大量に流すことで、原料ガスをウェーハ上に大量に供給しつつ、必要とされない反応生成物を素早く除去してきた。これは高性能化を達成するために原材料をより大量に使うという意味で一種の力業といえる。ミニマルファブではキャリアガスをずっと減らす必要がある。2007年頃から、横浜国立大学の羽深等教授との共同研究でこのCVD化学反応の効率向上という重要な基礎研究を行ってきた⁴⁾。研究当初はハーフィンチウェーハ・エピタキシャル反応炉での水素使用量は1L/min.であった。その後、水素と反応ガスでウェーハに触れないでムダに排気されるガスを極力なくすように反応管を狭めたり、気流制御によってガスの利用効率を向上させるなどの基礎的改善を行ってきた(図6)。現時

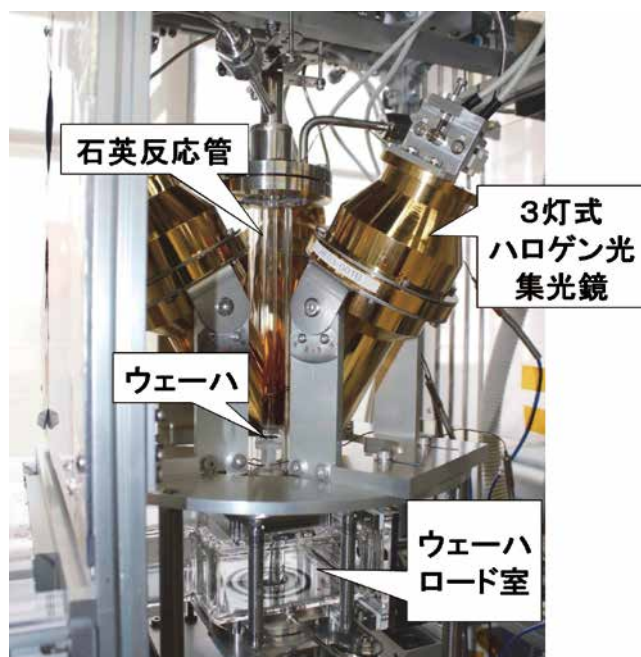


図6 集光加熱型エピタキシャルCVD炉

点では最高0.05L/min.で済むレベルまで向上している。すなわち水素の使用効率が20倍に上がったということである。既にシリコン上のホモエピタキシャル成長(シリコン基板上の成長シリコンの単結晶性)を確認している。今後は、バルブが100個もあるエピタキシャル成長に必要なあらゆる部品とユニットをミニマル筐体に収めるための超小型化開発が課題となる。エピタキシャルCVD装置が完成するまでは、既存の大口徑ウェーハにエピタキシャル成長したウェーハをハーフィンチにくり抜く現在開発された手法で、エピタキシーが必要なほとん

どのデバイスの開発、製造に対応出来る。なお、エピタキシーを必要としない、TEOS(Tetraethyl orthosilicate)膜等のプラズマCVD装置は、既にミニマル装置に収まり実用化されている。

4-4 ミニマルファブのスケールアップ

プロセス上もう一つ重要な点は、ミニマルファブではウェーハが非常に小さいために、ビームテクノロジーには大変適しているということである。大口径ウェーハではビームスキャンには膨大な時間がかかるが、ミニマルファブは面積が1/1,000なので、1,000倍早くスキャンできる。実際、現行光露光はマスクレスのスキャン方式であり(図7)、大口径では相当に時間がかかるが、ミニマルファブでは1ウェーハの露光は5分である⁵⁾。プラズマエッチングもノズルプラズマをスキャンすることで面内均一にエッチングが可能となっている⁶⁾。

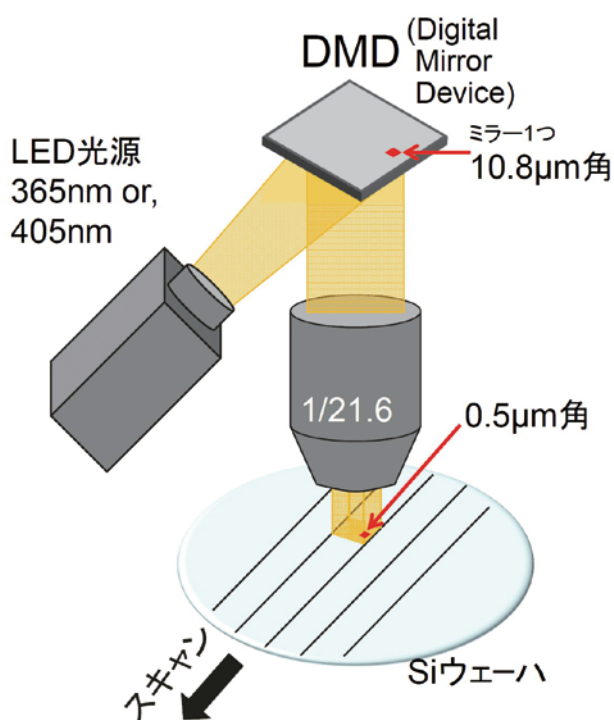


図7 マスクレス光露光の原理。DMDデバイスを用いる。

以上、ミニマルファブはメガファブの1/1,000と定義したが、それぞれの指標は、ほぼ1/100~1/10,000のスケールダウンファクターになっている。生産スピードについては、スケラブルではなく、メガファブと同じ水準の1分1プロセスを目標としている。装置スピードの改善をほとんど図っていない現時点で、ストップウォッチでの測定で5分/プロセスを達成しており、将来1分1プロセスは可能になるであろう。

まとめると、生産スピード1/10,000~1/1,000(/cm²)、ウェーハ面積約1/600、空調電力1/10,000、装置電力1/1,000、フットプリント1/100である。ミニマルファブは一部屋で収まってしまうサイズなので、フットプリントを無理して1/1,000にする必要はない。投資コストは、現在は1/100であるが、これは全ての装置部品が特注であることによる。装置価格が量産価格でない現状を鑑みると、当面は試作向けと少量の高付加価値デバイス向け市場をターゲットにしてゆくこ

とが適切な方向性と考えられる。今後ミニマルファブが量産されるようになると、製造装置価格は次第に下がり、最終的に1/1,000になってゆくことになる。

05 | ミニマルファブを用いたデバイス試作

ミニマルファブでは既に前工程の大半が完成しているため、(1)ミニマル装置だけを使うフルミニマルプロセスと、(2)ミニマル装置が完成していないプロセスだけ既存のメガ装置を併用するハイブリッドプロセスの2つの方法でデバイスを作ることができるになっている。図8に、ミニマルファブを用いてこれまで実現してきたデバイスを示している。最初、2012年にハイブリッドプロセスによって、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の基本構造であるカンチレバーの試作に成功した。その後、2013年にハイブリッドプロセス⁷⁾とフルミニマルプロセス⁸⁻⁹⁾によってMOSFETを動作させることに成功した。2015年にはフルミニマルプロセスでCMOSデバイスができ、また、集積回路の基本構造であるリングオシレータの発振が確認された。2016年にはミニマル装置を用いるBGA(Ball Grid Array)パッケージが開発された¹⁰⁾。このように基本デバイスは既にミニマルファブを用いて作ることができ、試作には十分な性能を持つに至っている。今後は、CMOS単体の素子を完全に安定に作れるように、プロセスの安定化を図ってゆく。具体的には現時点でも、MOSFETでは±10%程度の電流ばらつきに留まっており、相当に安定性が高くなってきている。それでも集積回路へのステップアップをするには、より安定なCMOS単体素子が欠かせない。今後はその開発に注力してゆく。

06 | おわりに

多品種少量生産に適した超小型デバイス製造システムであるミニマルファブは、2007年に産総研で提唱されてから10年を経て、実際にデバイス製造システムとして具現化された。エネルギー消費量、資源消費量は、ほぼ定義通り1/1,000を達成した。デバイスも単体レベルでCMOSができるなど、試作システムとして既に実用化されている。今後は、より資源生産性を向上させつつ、実デバイスの生産システムとしての実用性向上を図ってゆく。実際にミニマルファブを、少量生産でありながら実用となる新しい製造産業システムとして成立させることが最終的な到達点である。

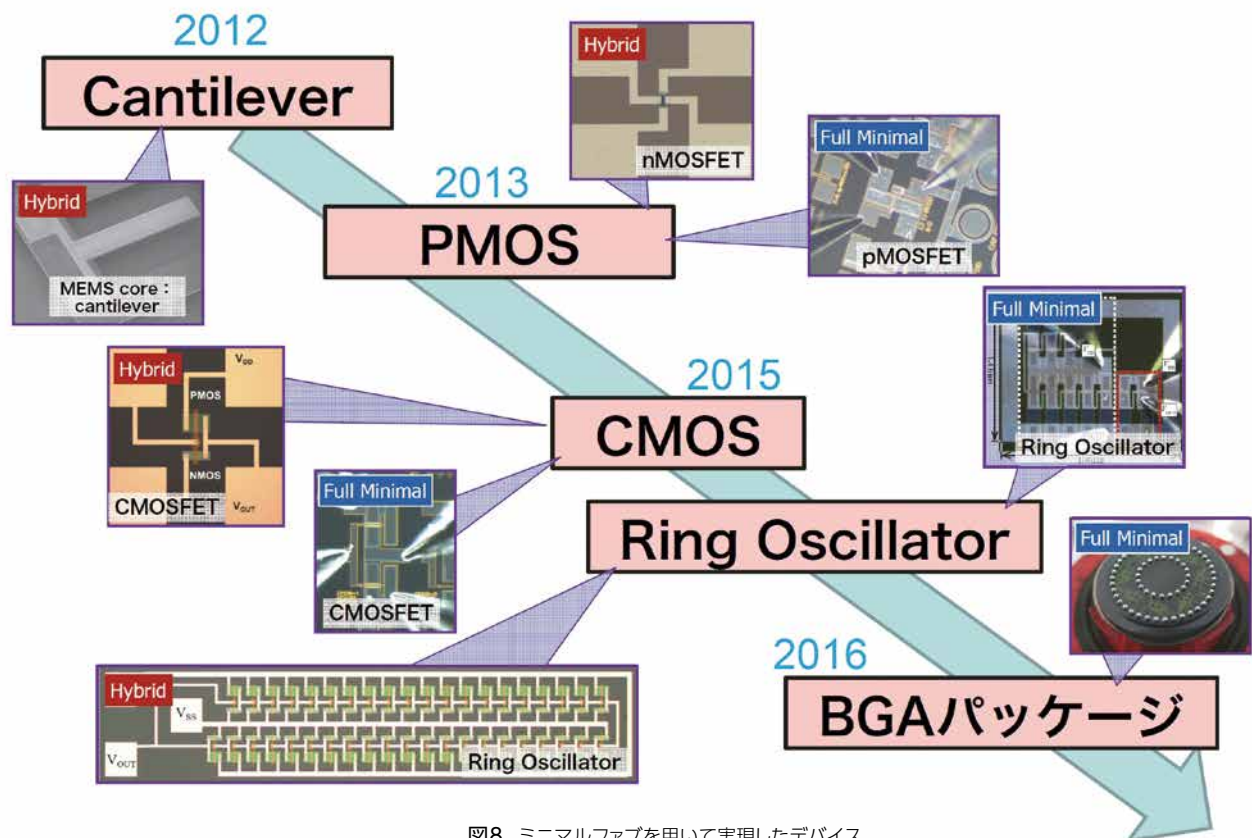


図8 ミニマルファブを用いて実現したデバイス

参考文献

- 1) 原 史朗, 前川 仁, 池田 伸一, 中野 禪, 精密工学会誌, **77**(3) 249-253 (2011).
- 2) 原 史朗, 前川 仁, 池田 伸一, Sommwawan Khumpuang, 中野 禪, 電子情報通信学会誌, **96**(8), 649-655 (2013).
- 3) 原 史朗, クンプアンソマワン, 谷島 孝, 前川 仁, 池田 伸一, 石田 夕起, エアロゾル研究, **31**(2), 81-88 (2016).
- 4) Ning Li, H. Habuka, Y. Ishida, S. Ikeda, and S. Hara, ECS J. Solid State Sci. Tech. **5**(5), 280-284 (2016).
- 5) S. Khumpuang, H. Maekawa, and S. Hara, IEEJ Trans. Sens. Micromachines, **133**(9), 272-277 (2013).
- 6) クンプアンソマワン, 原 史朗, 電気学会誌 **135**(8) 549-553 (2015).
- 7) S. Khumpuang and S. Hara, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, **28**(3), 393-398 (2015).
- 8) クンプアンソマワン, 原 史朗, 電気学会誌 **135**(8) 543-548 (2015).
- 9) S. Khumpuang F. Imura, and S. Hara, " Analyses on Cleanroom-Free Performance and Transistor Manufacturing Cycle Time of Minimal Fab," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, **28**(4), 551-556 (2015)
- 10) 居村 史人, 東野 泰英, 寶池 広由, 北山 侑司, 数佐 純子, 井上 道弘, 猿渡 新水, クンプアンソマワン, 原 史朗, スマートプロセス学会誌, **5**(5), 280-287(2016).