

ミニマルファブの MEMS 及び 3D 構造製造技術への適用可能性

MEMS and 3D-structure Fabrication Potential in Minimal Fab

産業技術総合研究所¹, ミニマルファブ推進機構²,
○クンプアン ソマワン^{1,2}, 原 史朗^{1,2}
AIST¹, MINIMAL²,
Sommawan Khumpuang^{1,2}, and Shiro Hara^{1,2}
E-mail: Sommawan.khumpuang@aist.co.jp

【背景と研究目的】 超小型デバイス製造システムミニマルファブは、ハーフインチという小さなウェハーを使い、一つ一つの装置も人サイズのために、少量生産に適している。MEMS デバイスや 3D 構造を有する多くのデバイスは、多品種であって少量生産のために、ミニマルファブに極めて適しているとされている。そこで、ミニマルファブの開発を担ってきた産業技術総合研究所と一般社団法人ミニマルファブ推進機構・ファブシステム研究会では、CMOS という基幹技術[1]に加えて、MEMS 向けにミニマルファブの開発を進めてきた。2012 年に、MEMS の基本技術を集約したものと見なされている、アクチュエーター型カンチレバーの試作に成功したが、当時のミニマル装置の利用率は 27%程度であり、73%は既存の巨大装置（ここではメガファブ装置と呼ぶ）にハーフインチウェハを入れてプロセッシングしたものであった[2]。その後 MEMS 向けの装置を次第に開発し、ミニマルファブで試作できる MEMS デバイスの種類も増え、かつミニマル装置利用率も向上してきた。具体的には、新型圧力センサー[3]や pH センサー、それに光導波路、加速度センサー等が試作できるようになってきている。本稿では、これらの実績を踏まえて、ミニマルファブが現在どの程度 MEMS や 3D 形状デバイスの形成に利用可能なのかについて、包括的に解説、議論する。

【MEMS と 3D 構造形成に必要な技術とその課題】 MEMS デバイス及び 3 次元構造の製造技術は、基本トランジスタ製造プロセスと異なったプロセスがあり、多くの MEMS デバイス製造にはウェハーの裏面にも構造作製や裏面から深いエッチング（これを**深掘りエッチング**と称する）が要求されている。また、メンブレン構造や極薄構造を作成するため、**SOI ウェハー**の使用が求められている。MEMS センサの物理的な状態を電気的な情報に変換するため、**圧電素子**や**ピエゾ抵抗素子**が用いられる。ピエゾ抵抗素子は半導体デバイスのドーピングと同様に形成できるが、圧電素子(PZT、AlN 等)の成膜プロセスは新たに適用が必要である。MEMS 工程で使用される金属のバリエーションはトランジスタ工程より多く、特に **Ti, Pt, Cr, Au** が使われている。圧電素子と金属のエッチングに、ウェットエッチングができない場合があり、**金属プラズマエッチャー**や**イオンミリング装置**を適用する。Si 等方性エッチングをする場合、Si 以外の材質とのエッチング選択性極めて高い方法、**XeF₂** ガスを用いるドライエッチングシステムを使用する。最後に微細構造のウェットエッチングや洗浄後の乾燥で液の表面張力に基づく毛細管力で構造が倒壊する現象が生じるため、**超臨界乾燥技術**が使われている。ミニマル装置使用率を高めるための装置開発を進めている。図 1 のように MEMS の代表的なデバイスにおける主な技術及び素子調査結果を示す。

【調査結果】 現状のミニマルファブでは代表的な MEMS デバイスプロセス中に 75%以上の MEMS 技術適用が可能になるが、まだ使えない工程は 8)、9) 工程（図 1）となる。ミニマルファブのみで試作不可能なデバイスは DMD(Digital Mirror Device)、RF-MEMS、イメージセンサであるが、メガファブ装置と併用したハイブリッドプロセスの適用が可能である。しかし、メガファブでは装置のローディングや真空排気、ウェハー治具のセットなどでミニマルファブより相当に時間を要するので、デバイス完成までの cycle time(=全製造時間+待機時間などの完成までの全時間)が相当に長くなる。現状では、プリンタヘッドや光導波路等一部の MEMS デバイスや 3D 構造デバイスは、ミニマルファブだけ（ミニマル装置化率 100%）で製造できる。装置が不足しているデバイスについても、メガファブとの併用のハイブリッド方式で作ることが可能となっている。全体として、メガファブだけで作るよりもずっと早くできることがわかる。結論として、現時点においても、ミニマルファブは MEMS デバイスの開発と試作には非常に有効であると言える。

【調査結果】 現状のミニマルファブでは代表的な MEMS デバイスプロセス中に 75%以上の MEMS 技術適用が可能になるが、まだ使えない工程は 8)、9) 工程（図 1）となる。ミニマルファブのみで試作不可能なデバイスは DMD(Digital Mirror Device)、RF-MEMS、イメージセンサであるが、メガファブ装置と併用したハイブリッドプロセスの適用が可能である。しかし、メガファブでは装置のローディングや真空排気、ウェハー治具のセットなどでミニマルファブより相当に時間を要するので、デバイス完成までの cycle time(=全製造時間+待機時間などの完成までの全時間)が相当に長くなる。現状では、プリンタヘッドや光導波路等一部の MEMS デバイスや 3D 構造デバイスは、ミニマルファブだけ（ミニマル装置化率 100%）で製造できる。装置が不足しているデバイスについても、メガファブとの併用のハイブリッド方式で作ることが可能となっている。全体として、メガファブだけで作るよりもずっと早くできることがわかる。結論として、現時点においても、ミニマルファブは MEMS デバイスの開発と試作には非常に有効であると言える。

[1] 原史朗 他「電気学会」、Vol.135, No. 8, 2015, pp. 534-537 [2] 数佐 純子 他、第 62 回応用物理学会春季学術講演 11a-A29-9 (2015). [3] 柳 永勲他、2017 年 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会 6p-C21-14 (2017).

MEMS技術 代表的な デバイス	MEMS技術									minimal fab 使用率 (%)
	1) SOIウェハ	2) 厚膜レジスト形成	3) 表面アライメント	4) 深掘りエッチング	5) 巨微細形成	6) 電極全面成膜	7) イオンミリング	8) XeF ₂ エッチング*	9) 超臨界乾燥*	
圧力センサ	○	○	○	○	△	○	△	—	△	85.7
加速度センサ	○	○	○	○	△	○	△	—	△	85.7
角速度センサ	○	○	○	○	△	○	△	—	△	85.7
AFMカンチレバー	○	○	○	○	○	○	○	△	△	75.0
DMD	○	△	○	○	○	○	—	○	○	71.4
DNAチップ	—	△	—	△	—	—	—	—	—	100.0
プリンタヘッド	○	○	○	○	○	○	○	—	—	100.0
RF-MEMS	—	○	—	—	—	○	○	—	○	75.0
イメージセンサ	○	○	○	○	△	○	△	○	○	75.0
マイクロ流路	—	○	—	○	—	—	—	—	—	100.0
光導波路	○	—	—	△	—	△	△	—	—	100.0
○：重要な技術、△：デバイス構造によって必要な場合がある、—：不要 *ミニマルファブで使えないプロセス装置										

図 1 MEMS 及び 3 次元構造製造に必要な技術