



INTERNATIONAL  
TECHNOLOGY ROADMAP  
FOR  
SEMICONDUCTORS

2011 EDITION

MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS  
(MEMS)

THE ITRS IS DEvised AND INTENDED FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT ONLY AND IS WITHOUT REGARD TO ANY COMMERCIAL CONSIDERATIONS PERTAINING TO INDIVIDUAL PRODUCTS OR EQUIPMENT.

# 訳者まえがき

この文書は International Technology Roadmap for Semiconductors 2011 Edition(国際半導体技術ロードマップ 2011 年版)本文の日本語訳である。

国際半導体技術ロードマップ(以下 ITRS と表記)は、米国、日本、欧州、韓国、台湾の世界5極の専門家によって編集・作成されている。日本では、半導体技術ロードマップ専門委員会 (STRJ) が電子情報技術産業協会 (JEITA) 内に組織され、日本国内で半導体技術ロードマップについての調査活動を行うとともに、ITRS の編集・作成に貢献している。STRJ 内には 15 のワーキンググループ (WG: Working Group) が組織され、半導体集積回路メーカ、半導体製造装置メーカ、材料メーカ、大学、独立行政法人、コンソーシアムなどから専門家が集まり、それぞれの専門分野の調査活動を行っている。

ITRS は改版を重ねるごとにページ数が増え、2011年版は英文で 1000 ページを超えるの文書となった。このような大部の文書を原文で読み通すことは専門家でも多大な労力を要するし、専門家であっても技術分野が少し異なると ITRS を理解することは必ずしも容易でない。STRJ の専門委員がその専門分野に応じて ITRS を訳出することで、ITRS をより親しみやすいものにすることができるのではないかと考えている。

なお、ITRS 2005 年版(英語の原書)までは、ウェブ公開とともに、印刷された本としても出版していたが、ITRS 2007 年版以降、は印刷コストが大きくなってきたこと、ウェブ上で無料公開されている文書の出版版を本の形で有償頒布しても需要が限られることなどのため、印刷物の形での出版を断念し、ウェブ公開のみとなった。ITRS の読者の皆様にはご不便をおかけするが、ご理解願いたい。ITRS 2009 年版以降、電子媒体で ITRS を公開することを前提に編集を進め、ITRS の表は原則として、Microsoft Excel のファイルとして作成し、そのまま公開することにした。

ITRS は英語で書かれている。日本語訳の作成は、STRJ 委員が分担してこれにあたり、JEITA の STRJ 担当事務局が全体の取りまとめを行った。訳語については、できる限り統一するように努めたが、なお、統一が取れていないところもある。また、訳者によって、文体が異なるところもある。ITRS の原文自体も多くの専門家による分担執筆であり、そもそも原文の文体も一定していないことも、ご理解いただきたい。誤訳、誤字、脱字などが無いよう、細心の注意をしているが、短期間のうちに訳文を作成しているため、なお間違いが含まれていると思う。また、翻訳の過程で原文のニュアンスが変化してしまうこともある。訳文についてお気づきの点や、ITRS についてのご批判、ご意見などを事務局まで連絡いただけますよう、お願い申し上げます。

今回の訳出にあたっては、ITRS の本文の部分のみとし、ITRS 内の図や表の内部の英文は訳さないでそのまま掲載することとした。Executive Summary の冒頭の謝辞 (Acknowledgments) に、ITRS の編集にかかわった方々の氏名が書かれているが、ここも訳出していない。

原文中の略語については、できるかぎり、初出の際に、「ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように () 内に原義を示すようにした。英文の略号をそのまま使わないで技術用語を訳出する際、原語を引用したほうが適切と考えられる場合には、「国際半導体技術ロードマップ (ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors、以下 ITRS と表記)」「国際半導体技術ロードマップ (International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように和訳の後に () 内に原語やそれに対応する略語を表示した。Executive Summary の用語集 (Glossary) も参照されたい。原文の括弧 () があってそれを訳するために括弧を使った場合もあるが、前後の文脈の関係で判別できると思う。また訳注は「【訳者注: この部分は訳者の注釈であることを示す】」のように【】内に表記した。また [] 内の部分は、訳者が原文にない言葉をおぎなった部分であることを示している。訳文は厳密な逐語訳ではなく、日本語として読んで意味が通りやすいように意識している。ITRS のウェブ版ではハイパーリンクが埋め込まれているが、今回の日本語版ではハイパーリンクは原則として削除した。読者の皆様には不便をおかけするが、ご理解いただければ幸いである。

今回の日本語訳全体の編集は全体のページ数が膨大であるため、大変な作業となってしまいました。編集作業を担当いただいた、JEITA 内 SRTJ 事務局の進藤淳二さん、関口美奈さんに大変お世話になりました。厚くお礼申し上げます。

より多くの方に ITRS をご活用いただきたいとの思いから、今回の翻訳作業を進めました。今後とも ITRS と STRJ へのご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

2012 年 5 月  
訳者一同を代表して  
電子情報技術産業協会 (JEITA) 半導体部会 半導体技術ロードマップ専門委員会 (STRJ) 委員長  
石内 秀美 (株式会社 東芝)

## 著作権について

# ORIGINAL (ENGLISH VERSION) COPYRIGHT © 2011 SEMICONDUCTOR INDUSTRY ASSOCIATION

All rights reserved

ITRS •SEMATECH, Inc. , 257 Fuller Road, Albany, NY12203 • <http://www.itrs.net>  
Japanese translation by the JEITA, Japan Electronics and Information Technology Industries  
Association under the license of the Semiconductor Industry Association

### —引用する場合の注意—

原文(英語版)から引用する場合： ITRS 2011Edition page XX, Figure(Table) YY  
この日本語訳から引用する場合： ITRS 2011Edition (JEITA 訳) XX 頁,図(表)YY  
と明記してください。

-----  
問合せ先：

一般社団法人 電子情報技術産業協会  
半導体技術ロードマップ専門委員会 事務局  
電話: 03-5218-1068 電子メール: [roadmap@jeita.or.jp](mailto:roadmap@jeita.or.jp)

# TABLE OF CONTENTS

MEMS.....	1
1 Scope.....	1
1.1 Accelerometers .....	5
1.2 Gyroscopes .....	6
1.3 Microphones.....	7
1.4 RF MEMS.....	9
2 Difficult Challenges .....	10
2.1 Accelerometers .....	11
2.2 Gyroscopes .....	11
2.3 Microphones.....	11
2.4 RF MEMS.....	12
3 Technology Requirements .....	13
3.1 Accelerometers .....	13
3.2 Gyroscopes .....	14
3.3 Microphones.....	14
3.4 RF MEMS.....	14
4 Potential Solutions .....	15
4.1 Design and Simulation .....	15
4.2 Packaging and Integration .....	16
4.3 Test .....	17
5 Cross-Cut Issues .....	18
5.1 Assembly And Packaging .....	18
5.2 Test .....	19
5.3 RF and Analog Mixed Signal .....	19
6 Emerging MEMS for Mobile Applications .....	19
6.1 Optical Filters .....	19
6.2 Picoprojector .....	20
6.3 Electronic Nose .....	22
6.4 Microspeakers.....	24
6.5 Ultrasound Devices .....	24
7 Conclusions .....	26
8 References .....	28

## LIST OF FIGURES

Figure MEMS1	The combined need for digital and non-digital functionalities in an integrated system is translated as a dual trend in the International Technology Roadmap for Semiconductors: miniaturization of the digital functions (“More Moore”) and functional diversification (“More-than-Moore”).	8
Figure MEMS2	Path of increasing integration beginning with mainframe computers to minicomputers, PCs, desktop internet, and to mobile internet devices such as smartphones and tablet computers.	4
Figure MEMS3	Unit shipments for motion sensors in handsets and tablets are forecasted to reach 1¾ billion by 2015.	4
Figure MEMS4	The MEMS accelerometer, introduced in the iPhone by Apple, enabled the functionality of automatic screen rotation.	6
Figure MEMS5	3-axis gyroscopes	7
Figure MEMS6	CMOS MEMS Microphone Die and Packaged Microphones	8
Figure MEMS7	The Si Time SiT9104 provides six single-ended clock outputs, two from each PLL, which can operate at up to 220 MHz. Each PLL and associated pair of clock outputs can be driven by independent voltage supplies (1.8, 2.5, 2.8 or 3.3 V), and each output pair on the differential output SiT9103 can be configured to one of three signaling levels, LVPECL, LVDS or CML.	9
Figure MEMS8	A MEMS Narrow Band Tunable Filter. <sup>16</sup>	20
Figure MEMS9	TI’s prototype USB picoprojector nHD Pico with 20 lumens, 640 x 360 resolution, a contrast ratio greater than 1,000:1, a true RGB LED wide color gamut and reliance on a low-power Pico DPP2601 2607 ASIC processor.	21
Figure MEMS10	(a) Schematic cross-section of a capacitive micromachined ultrasound transducer (cMUT), (b) SEM detail of four dual thickness cMUT cells from a 2D array of acoustic pixels, and (c) COMSOL simulation of the first eigenmode of a dual thickness cMUT cell.	1

## LIST OF TABLES

Table MEMS1	MEMS Accelerometer Technology Requirements (LINK)	14
Table MEMS2	MEMS Gyroscope Technology Requirements (LINK)	14
Table MEMS3	MEMS Microphone Technology Requirements (LINK)	14
Table MEMS4	RF MEMS Resonator Technology Requirements (LINK)	15
Table MEMS5	RF MEMS Galvanic Switch Technology Requirements (LINK)	15
Table MEMS6	RF MEMS Varactors Technology Requirements (LINK)	15
Table MEMS7	Sensing Technologies Suitable for Electronic Nose Devices	23



# MEMS

*“It is not enough that you should understand about applied science in order that your work may increase man's blessings. Concern for the man himself and his fate must always form the chief interest of all technical endeavors; concern for the great unsolved problems of the organization of labor and the distribution of goods in order that the creations of our mind shall be a blessing and not a curse to mankind. Never forget this in the midst of your diagrams and equations.”*

– Albert Einstein (1879 - 1955)

## 1 SCOPE

2011年にITRS MEMS・テクノロジー・ワーキンググループ (TWG) が設立され、ITRSロードマップに新しい章が設けられました。この設立の起源となったのは、2010年3月にカリフォルニア州サンノゼで開催されたMEMS・インダストリー・グループ (MIG) による、MEMS製造チャレンジに向けた2010METRICワークショップです。このワークショップにおける重要なメッセージは、MEMSデバイスの製造においては、デバイス・テストの工程が、製造コストの20%～70%を占めるのが一般的であり、その事が、MEMSデバイス製造では、大きな懸案事項となっているという共通認識でした。そこで、MIGメンバーは、デバイステストに対する現時点での課題と、要求内容を評価するために、次年度に本テーマに関するワークショップを企画することになりました。このメッセージは、2010年夏のiNEMIにおけるMEMS・テクノロジー・ワーキンググループ (TWG) 設立を促し、その主旨は2010年11月にiNEMIに報告されました。この報告は、iNEMI2011ロードマップにおいて、MEMS/センサーの章として公表されました。iNEMIとITRSの連携に歩調を合わせ、ITRS MEMS・テクノロジー・ワーキンググループ (TWG) 設立の提案は、日本の筑波で2010年の12月1日開催されたITRSのウィンター・ミーティングで国際ロードマップ委員会 (IRC) に上奏され、承認されました。ITRS MEMS・テクノロジー・ワーキンググループ (TWG) は、ドイツのポツダムで2011年の4月11日に開催されたITRSの春・ミーティングで、活動報告を公表し、正式な委員会として承認され、来る2011年のITRS報告書に新たにMEMSの章を設ける事となりました。この報告には、モバイル・インターネット・デバイス (例えば、スマートフォンやタブレットPC) に焦点を絞ったiNEMIレポートの情報も含まれ、また、ITRSロードマップの主たる特徴である、関連する各種技術の開発スペックテーブルも追加されます。MEMS (マイクロ・エレクトロ・メカニカル・システムズ) とは、IC (集積回路) 製造に用いられる技術と多くの共通点を持つ技術で製造されるデバイスです。それらのデバイスは、マイクロメーターサイズの機械的構造 (支持梁、カンチレバー、膜、流路 等) で構成され、しばしば、アナログ回路とデジタル回路部が一緒に作り込まれています。MEMSデバイスは、自身が置かれた周囲環境の情報を検知する各種センサーにもなり得るし、また、制御システムからの指令に基づき、周囲環境に物理的な影響を与える各種アクチュエータにもなり得ます。MEMSデバイスの概念を最初に取り上げたのは、50年以上も前の1959年にリチャード・ファインマン博士によってなされた有名な講演「原子レベルには発展の予定がある (原題: "There's Plenty of Room at the Bottom")」であるとしばしば紹介されます。工作機械で自身よりも小さい (例えば1/4サイズの) 工作機械を作り、その工作機械で更に小さい (例えば1/16サイズの) 工作機械を作る、という作業を繰り返せば、そのサイズは分子・原子レベルに至るという内容を含む講演です。しかし、実際には、例えばKulite社の様な企業がファインマン博士の講演よりも先に、既にMEMS技術に基づく新しいセンサーの開発に着手していました (1958年)。固定部に支持された膜と可動出来る機械的構造を備えた微細な電気機械デバイスが60年代に誕生し、更に70年代にはバルク・マイクロマシニングと呼ばれる手法により、開発が進みました。その手法とは、エッチング技術により、シリコン製のウエハ基板から各種の機械的構造を可動出来る形とする手法でした。そして、今日、我々が表面マイクロマシニング手法として知る手法は、80年代初頭に、HoweとMullerによって最初にデモと共に示されました。その際、ポリシリコンが機械的な構造材料として用いられていました。MEMS技術は、半導体技術の副産物、もしくは副次的なイノベーションと捉えられています。しかし、

MEMS技術は半導体技術とは異なり、適用されるアプリケーション毎に、文字通り、何百何千という固有の技術を用いて製作されています。そのアプリケーション、製造技術、材料の多様性と、半導体技術におけるCMOSTランジスターのような基本ユニットが無いことで、MEMS技術は、巨大な規模を誇る半導体工場というよりは、むしろ、小さな工房による注文生産というイメージで捉えられました。MEMS技術のロードマップの視点で、もちろん、多くの仕事はなされましたが、これまでは、業界内部での連携不足により、ロードマップの視点で必ずしも十分ではありませんでした。そこで、今後は、横断的なニーズに対する業界全体としてのコンセンサスが重要と認識されています。ディスプレイ・センサー技術と同様に、MEMS(マイクロ・エレクトロ・メカニカル・システムズ)技術は、物理から、光学、化学、バイオに至るまで多種多様なアプリケーションを持ちます。それらは、そのMEMSデバイスを製作するのに用いられる材料、及び手法も同様に多種多様である事を意味します。MEMS技術が与えた最初のイメージが、これまでよりもより小さなセンサーやアクチュエータを実現する為の研究開発テーマであったことは間違いありません。しかし、MEMS技術の本質は、各種機能の統合にあります。それは、情報処理、信号処理、自己テスト機能、通信機能などを兼ね備えたセンシングとアクチュエーション機能の統合です。1965年に発表された論文の中で、ゴードン・ムーア氏は、「部品あたりのコストが最小になるような複雑さは、毎年およそ2倍の割合で増大してきた。短期的には、この増加率が上昇しないまでも、現状を維持することは確実である。」と記した。この傾向は、「ムーアの法則」という言葉を生み出し、ITRSにおけるロードマップの支配的な主題であった。しかし、電子機器製造業の成長傾向は、いわゆるモア・ザン・ムーア(MtM)と呼ばれる、多種多様な機能の統合との関係性も生じさせました。この要点は、IEEEスペクトラムに記されています。ITRSは、ロードマップの議論において、MtMの項目も議論してきました。2010年度版のITRSロードマップのアップデート版には、正式なロードマップを、MtMの傾向に従って構築すべきかどうかという重要な議論が含まれています。図. MEMS1を参照下さい。

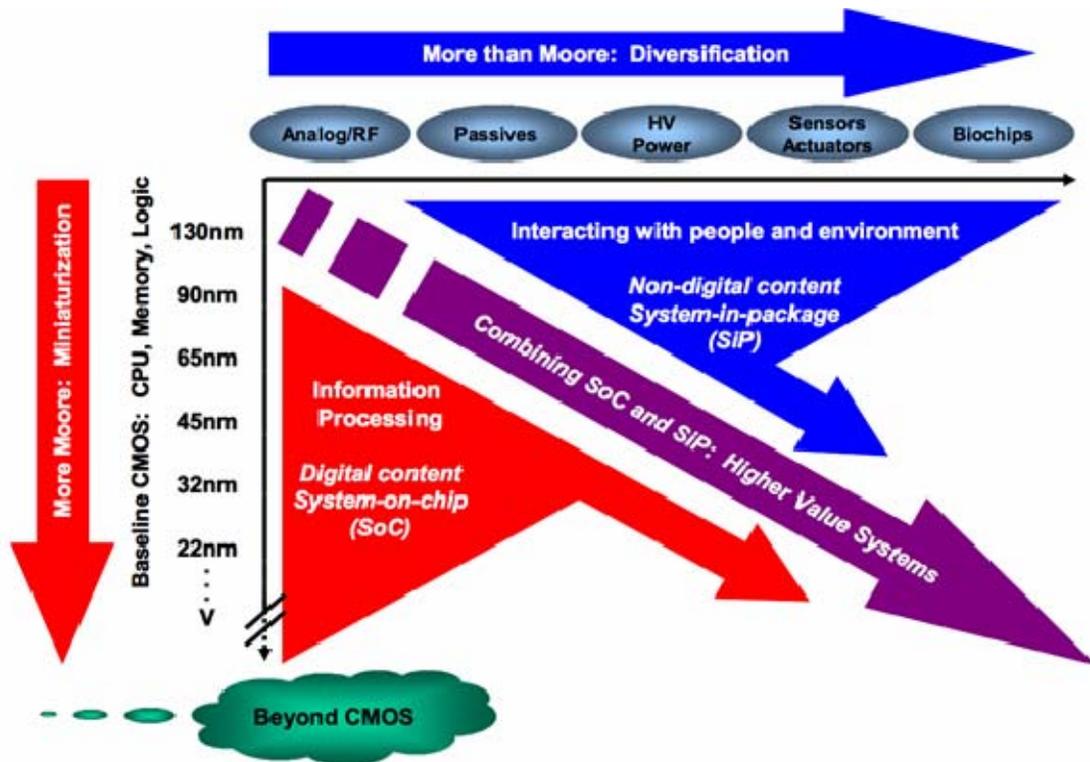


Figure MEMS1 The combined need for digital and non-digital functionalities in an integrated system is translated as a dual trend in the International Technology Roadmap for Semiconductors: miniaturization of the digital functions (“More Moore”) and functional diversification (“More-than-Moore”). エラー! ブックマークが定義されていません。

ITRS テクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)は、対象範囲を慎重に定義し、議論を開始しました。2つの基本的な課題があります。(1)どのようにしてMEMS技術のロードマップを策定していくべきか？ そして、(2)その中でITRSはどこに焦点を当てるべきか？ 既に、ITRSは、実行可能なロードマップとする為に、最低限満たすべき要件のリストを策定しました。これらの要件は、MtMホワイトペーパーの中で、次の様に定義されました。

- ・ロードマップとしての価値がある定量的な仕様項目
- ・MEMS業界のプレーヤーによるコミュニティの存在
- ・情報を共有する意志
- ・ロードマップの広い適用性が期待できる潜在市場規模の大きさ
- ・MEMS業界のキー・プレーヤーの間で、本ロードマップで定める仕様項目に沿うことが業界の利益につながるとの合意。

これらの要件の多くは、MEMS業界では、既に対策を実施すべきタイミングを迎えていました。MEMS産業グループは、改めて、デバイスのテストコストの上昇の問題解決の為にワークショップを開催する事を決めた事を示し、この様な、業界の共通の利益につながる情報を共有しようと意欲を持った業界プレーヤーによるコミュニティが存在する事を示しました。市場に関しても、コンシューマ向け電子機器関連アプリケーションで急速に成長すると予想される大きな市場情報もありました。iSuppli社は、スマートフォンやタブレット PC 分野向けに、毎年約30%という高い成長を予想していました。最後に、iNMEIの2011年度レポートのMEMSの章での記載内容を受けて、業界関係者の中で意見の合意につながる可能性が示されました。MEMSロードマップにおける、価値がある定量的な要求仕様、例えば、技術的なスペックテーブルの予想は、本活動に対する業界内での合意を得るためには重要でした。MEMS技術の適用先は非常に多種多様です。マイクロ熱デバイスや、手術用ツール、マイクロ流体デバイスから、既に良く知られたアプリケーションで活用されているインクジェットプリンターのヘッド、加速度センサー、そしてデジタル光プロジェクションデバイスまで、幅広く数多く活用されています。一方、ITRSは、対照的にマイクロプロセッサとメモリーの技術進展へフォーカスしたロードマップを提示していると認知されています。ムーアの法則の進化の一部として、MEMS技術のような多くの多様性を持つ機能に関する議論と、MtMのロードマップも含めて議論すべきとの意見がある一方で、MEMS技術の様な多様性を持つデバイスがどの様に実現されていくのかに関して、依然としてITRSメンバーの間でも様々な意見がありました。そのため、ITRS内の既存メンバーと潜在的なメンバーも含む新たなMEMS産業のプレーヤーによるメンバーの両者に対して、MEMS技術の多様性に関する懸念を解消する為に、正しい道筋の議論がとても大事でした。MEMSテクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)は、“モバイル・インターネット・デバイス”に関連する技術へと方向性を合わせました。この戦略の背景にある考えは、コンピューターの進化をメインフレームから、ミニコン、PC、そしてついにはスマートフォンやタブレットPCのようなモバイル・インターネット・デバイスに至る様子で説明する考えと似ています。戦略の焦点をここに合わせるという考え方は、MEMS業界における最大の成長分野が、このモバイル・インターネット・デバイスを目指しているという事実裏打ちされています。iSuppli社は、2015年には、端末やタブレット PC に搭載されるモーションセンサの伸びは17.5億台に迫ると予想しています。この様に、ITRSでは、半導体技術はコンピュータの進化に関連づけてロードマップが描かれます。そして、技術をひっぱり製品が進化が次のステップへと移れば、その変化に応じて、半導体技術のロードマップの関連づけも自然と変化します。

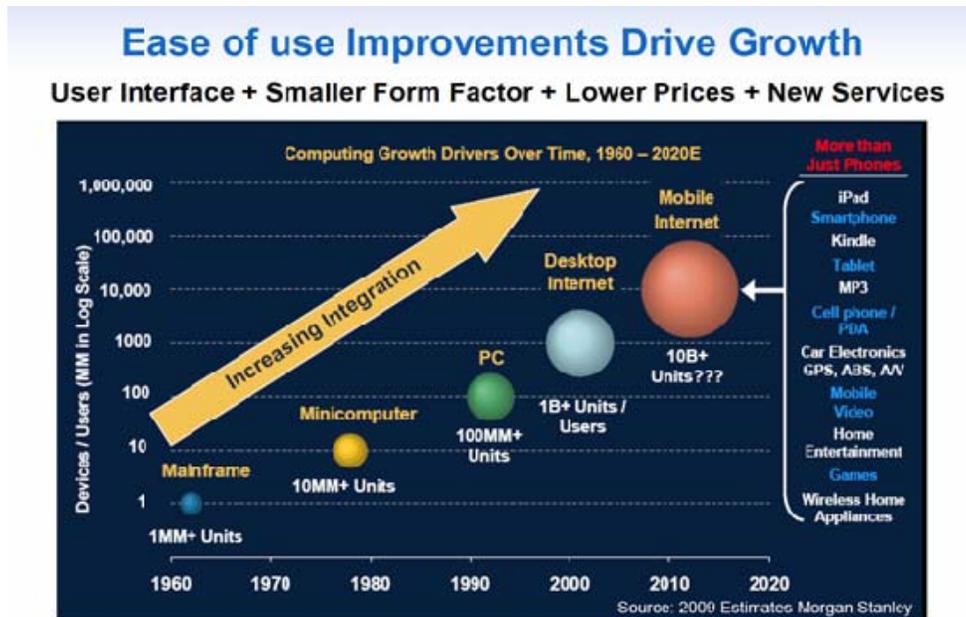
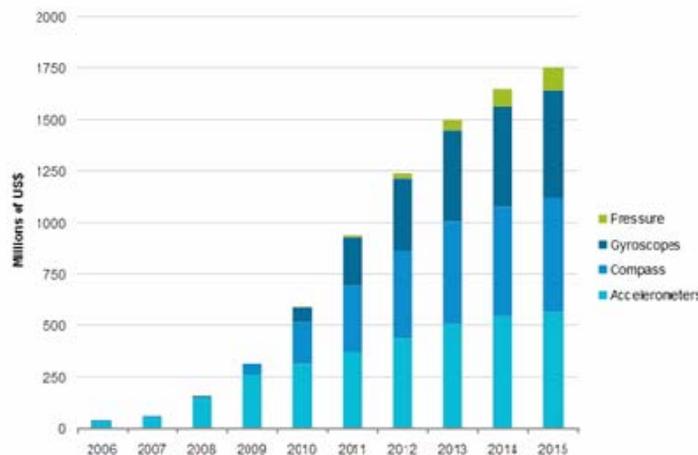


Figure MEMS2 Path of increasing integration beginning with mainframe computers to minicomputers, PCs, desktop internet, and to mobile internet devices such as smartphones and tablet computers.<sup>1</sup>

**Hottest of the hottest!!!**  
**Motion sensors in Handsets and Tablets**  
 (accelero, gyro, pressure + compass)



Source: IHS iSuppli Special Report "Motion Sensors in Handsets and Tablets", H1 2011

Copyright © 2011 IHS Inc. All Rights Reserved.

Figure MEMS3 Unit shipments for motion sensors in handsets and tablets are forecasted to reach 1¼ billion by 2015.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>From the 2011 iNEMI Report

<sup>2</sup>From iSuppli's MIG Webinar presentation "A Global Analysis of the Current MEMS Market" on July 27, 2011

ITRS MEMSテクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)によるロードマップ策定に対し、このような戦略をとるという決定は、ITRS内、及びMEMS産業の両者における協力に至る鍵でした。モバイル・インターネット・デバイスには、加速度計や、ジャイロスコープ、マイクロフォン、そして、WiFiや携帯電話などの無線機能としてのアプリケーションのニーズを持つ、共振器や、バラクタ、スイッチを含むRF MEMSデバイスの様なMEMSデバイスが含まれます。モバイル機器に対しては、将来搭載される可能性を持つ、さらにいくつかのエマージングMEMS技術があります。それらは、大画面に映像を映したり、プレゼンテーションを行う為のカメラやピコプロジェクターの性能を向上させる光学フィルターや、電子的な鼻、マイクロ・スピーカ、そして、超音波デバイスを含みます。これらのアプリケーションは、モバイル・アプリケーションに対するエマージングMEMSの章(第6章)で取り扱われます。また、これらに関する詳細は記載は、新しいデバイス技術を、この分野のロードマップで取り扱うべきかどうかを判断する際の指標として用いられます。

## 1.1 ACCELEROMETERS

イギリスの物理学者 George Atwood は 1783 年に加速度センサーを開発した。加速度センサーは、ほぼ一世紀に渡り、抵抗ブリッジ型のものが橋や動力計、飛行機に使われてきた。1979年に一体型のMEMS加速度センサーが考案された。初期の商用加速度センサーはバルクマイクロマシニング技術を使ったピエゾ抵抗型加速度センサーであった。しかしながら 1980 年代後半から 1990 年代前半にかけての、表面マイクロマシニングと静電容量検出技術の到来が、MEMS加速度センサーを車載用としての最初の商業的成功に導いた。1990 年後半までには、より厳しい自動車安全基準により促進され、MEMS加速度センサーの車載エアバッグ衝突センサーへの採用が広く普及した。2000 年代に入って、車載用加速度センサーの応用範囲は、各種機能の中でも、横転検知、横滑り防止などに広がった。しかしながら、民生のモーション、傾き検知アプリケーションへの採用は、2000 年後半ごろ MEMS 加速度センサーの価格、サイズ、消費電力が市場の要求レベルに達するまで時間がかかった。3軸 MEMS 加速度センサーを搭載した任天堂Wii、アップル iPhoneの登場は、民生携帯機器における MEMS 加速度センサーのユビキタス用途を開拓する、画期的な出来事となった。今日、3軸 MEMS 加速度センサーは、完全なモーションセンシングのニーズを満たすため、パーソナルナビ用としては3軸磁気センサーと共に、もしくは、IMU(慣性計測装置)を構成する為には3軸 MEMS ジャイロスコープと共に、ますます使用が増えている。(Figure MEMS4 参照)



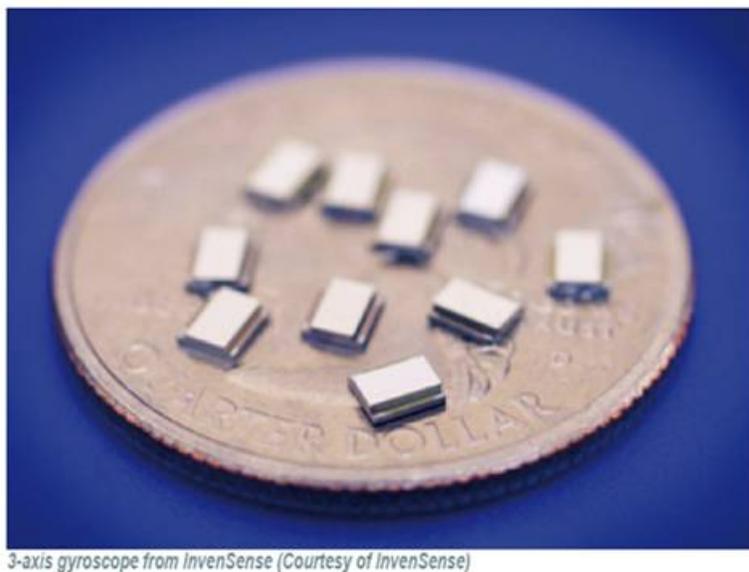
Figure MEMS4

*The MEMS accelerometer, introduced in the iPhone by Apple, enabled the functionality of automatic screen rotation.<sup>3</sup>*

## 1.2 GYROSCOPES

最初のMEMSジャイロスコープは圧電原理を利用したクォーツを使ったものであった。それらは1990年代後半に高級車に採用されていった。初期の商用シリコン MEMS ジャイロスコープは永久磁石を利用したものであった。それらは 2000 年代前半に登場した静電容量型シリコンジャイロスコープに次第に置き換わっていった。今日、シリコンやクォーツのMEMSジャイロスコープは、車載の電子姿勢制御、横転防止、GPSナビゲーション用として広く使用されている。民生アプリケーションへの MEMS ジャイロスコープの採用は、市場要求価格によって妨げられてきた。しかしながら、最近の技術の大きな進歩やコストダウンによって、ついに携帯電話、ビデオゲームコントローラー、カメラ、ビデオなどの市場への浸透が可能となった。

<sup>3</sup>From the 2011 iNEMI Report, source Apple. (Apple® and iPhone® are registered trademarks of Apple, Inc.)



3-axis gyroscope from InvenSense (Courtesy of InvenSense)

Figure MEMS5

3-axis gyroscopes<sup>4</sup>

### 1.3 MICROPHONES

50年間、マイク、スピーカー、トランスデューサといった音響部品は、基本的な部分は、変わらないままであった。その一つである ECM (Electret Condenser Microphone) は、何十億という携帯電話やポータブルコンピュータのようなポータブル電子機器に使われてきた。90年代には、技術の爆発的な進化により、フォームファクタはより小さくなっていき、同時に、携帯電話やノートブックコンピュータは、ホテルの部屋からロックコンサートまで幅広い環境で、リアルタイムなオーディオやビデオ通信をサポートすることのできる、より複雑で強力なマルチメディア機器へと進化していった。これらの新しいユースケースは、標準的な自動化製造ラインで残りのデバイスとして組み立てることができる、小型、薄型のマイクを必要としていた。MEMS マイクではそれが実証されていたにもかかわらず、消費者電子機器の音響デバイスに対する要求が ECM 技術の限界を超えるまで、デバイス設計者や生産者が、MEMS マイクに目も向けることはなかった。

MEMS マイクは、デバイスメーカーが顧客のより厳しいニーズを満たすための ECM を越える多くのメリットを提供した。最初のシリコン・マイクが採用された、主な理由は2つである。(1)シリコン・マイクは、同じかそれ以上の音響性能を持ちながら ECM よりもサイズが小さい、そして、(2)シリコン・マイクは、自動化された IC アセンブリと互換性があるという点でも ECM より優れており、それは、製造スループットと歩留まりを向上させる事ができる。これらの特徴が、2003年から2005年にあった携帯電話でのアナログ出力シリコンマイク採用の最初の大きな波の主な要因であった。

ポータブルコンピュータメーカーは、初めてデジタル出力の MEMS マイクロフォンを採用した。それは単に薄く、表面実装可能であった為だけではなく、設計者が初めてノートパソコンの(音響的に最高の場所である)ベゼルにマイクを配置して、画面周りのオーディオをトレースし、RF や EM の干渉を防止するための太いシールドケーブルを使用することなく、ノートパソコンのベースに信号を送れたからである。

アナログおよびデジタル出力マイクロフォンは、小型化も音響性能の向上のどちらも続いており、結果として、ますます携帯電話とノートパソコン市場で採用されている。多くのノートパソコンは、現在、VoIP 通信のためのカメラとベゼルのデジタルマイクロホンアレイを搭載しているし、最近では、一部の携帯電話は、雑音抑圧のために2つ以上のマイクを使用していると紹介されている。有線および無線のヘッドセットのような新しい市場のアプリケーションの後押しもあって、MEMS マイクが2013年には、10億ユニットを超えると予測されている(iSuppli 社、2010年2月)。

<sup>4</sup>From MIG's MEMS blog Contributed by Laurent Robin, MEMS Analyst, YoleDéveloppement, photo source InvenSense

最初のシリコンマイクは、一つのトランスデューサチップと、プリアンプと AD コンバータ、もしくは、AD コンバータを含む第二の IC とのマルチチップモジュールでした。これらの 2 つのデバイスは、MEMS マイクのパッケージ内で相互にワイヤボンディングされていた。MEMS ダイの製造は、内部の制限の多い製造設備で行われるが、たいていは、MEMS ファウンドリに外注することができる。最近では、CMOS MEMS と呼ばれるシングルチップマイク技術を使用した製品が導入された。このケースでは、MEMS トランスデューサ素子は、標準的な半導体ファウンドリの標準 CMOS プロセスのメタル層を用い、回路と一緒に CMOS プロセスで製造されている。この種の技術は、2 つのチップで構成されるのに比べ、相対的に小さいシリコン面積ですむという利点があり、小型、低コストのマイクにつながる。(Figure MEMS6 参照)

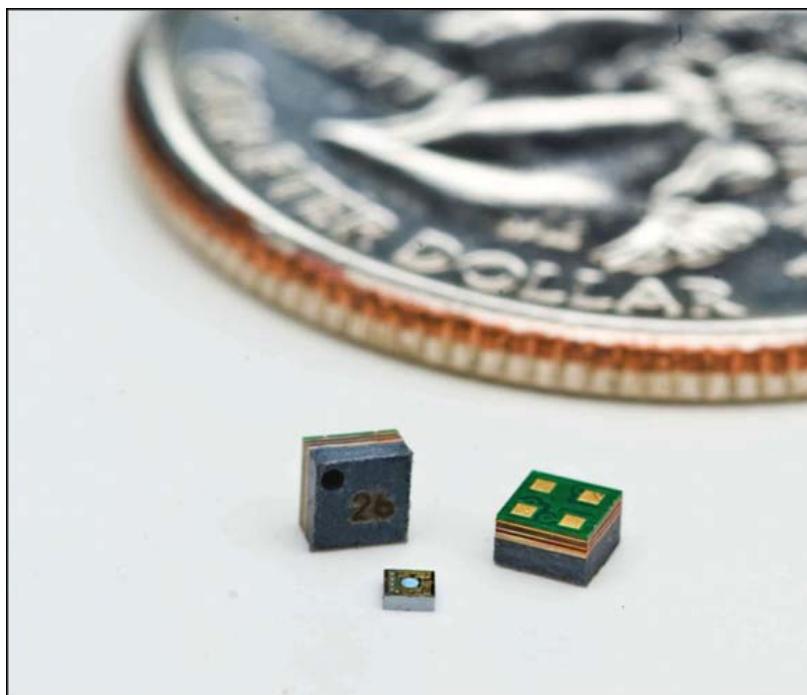


Figure MEMS6

CMOS MEMS Microphone Die and Packaged Microphones<sup>5</sup>

現在、ほとんどの MEMS マイクの製品は、2 チップ技術で作られている。実際、2 チップ・アプローチは標準となっているので、今日のいくつかの MEMS マイクサプライヤーは、独自の MEMS または ASIC のダイを設計もしくは製造するのではなく、他の半導体サプライヤーから購入しており、これは、違う MEMS マイクサプライヤーが同じ MEMS ダイおよび/または、ASIC を使用している、事を意味している。これは、MEMS マイクの市場において、セカンドソース製品の安定した供給という重要な役割を果たしている。しかし、MEMS マイクの顧客は、まだ、製品の革新に必要な独自の MEMS マイク設計を、これらの MEMS マイクのサプライヤーに依存している。

MEMS マイクロフンの性能は、単に実際の MEMS マイクロフンチップの設計だけによっているのではなく、マイク性能を最適化するための適切なサイズのアコースティック・ポートと同様に前面と背面の空気のボリュームを上手く供給できるようなパッケージデザインに大きく依存している。マイクパッケージの間違った設計は、感度低下や不要な共振による周波数特性悪化といった SNR (Signal-To-Noise Ratio) の低下を引き起こす。MEMS マイクのパッケージは、通常、ラミネートかメタルリッドによる基板ベースのパッケージである。マイクの音響ポートは、メーカーがエンドアプリケーションでマイクをマウントしたい方法に応じて、蓋や基板内ですることができ、前面／背面の空気の体積というマイク MEMS ダイ特有の要件に応じて、MEMS ダイは、音響ポートの、上／下に直接、または離して横に、配置することができる。MEMS マイクのパッケージングは、

<sup>5</sup>From the 2011 iNEMI Report, photo source Akustica:

マイクのサプライヤー専用のパッケージングおよびテスト施設で行う事もできるが、むしろ、標準的な半導体パッケージングハウスの専門的な知識とキャパシティを活用することもできる。

## 1.4 RF MEMS

RF MEMS デバイスには、FBAR (film bulk acoustic resonator) フィルタ、SAW (surface acoustic wave) フィルタ、レゾネータ(タイミングデバイス)、静電容量スイッチ/バラクタ、金属接点スイッチがある。一般に、これらのタイプのデバイスは、無線通信製品のディスクリートデバイスとして用途を見つげられてきたし、今後もそうであろう。例えば、FBAR フィルタは、基板かマザーチップにマウントされ、一方、Si MEMS 発振機は、既存ソケットの水晶発振器を置き換える。MEMS 個別部品の性能は、一般的に、前世代の製品 (MEMS であれ、非 MEMS であれ) よりも、同等か優れている。大きなパフォーマンス上の利点を持っているものの明確なコストメリットのない部品は、様々な経済的要因と技術の成熟、既存の部品を置き換えるに足る信頼性の実証といった理由から、その採用が遅くなりがちである。後者の一例は、MEMS スイッチ (容量と金属接触) を含むパッケージ部品の信頼性である。パフォーマンスが商品に望まれる機能と比較して顕著なコスト障壁をなくしてしまう場合、エアバッグセンサーやインクジェットプリンターで使われてきた Si 微細加工のような、成熟した MEMS プロセス技術の実績があるが故に、市場参入は、相対的に早く進んでいる。RF MEMS デバイスがハイボリュームで生産される場合、しばしば、MEMS の機能は、CMOS、BiCMOS、またはバイポーラ半導体ダイに統合される。この統合のタイミングは、主にコストによって決定される。最初の導入は、次のような順序で起こる。1). ディスクリートダイの恩恵 (例えば、FBAR デバイス)、2) IC の上または下に RF MEMS チップを 3D スタッキング (たとえば、可変コンデンサ)、そして、3) IC とのモノリシック・インテグレーション、これは、いくつかのデバイスで MEMS パッケージのカスタマイズを除くことで、潜在的に、材料費を下げられ、インテグレーションとコスト削減による新しいアプリケーションを可能とする。

MEMS TWG は、RF MEMS デバイスを 3 タイプ採用し、それは、前段落の 2)、3) に該当する、共振器、バラクタ、およびスイッチである。これら三つは、短期的に、スマートフォンやタブレットなどモバイル・インターネットデバイスでの使用が期待されている。

### 1.4.1 RF MEMS RESONATORS

多くの企業が、クロックおよびタイミング・アプリケーションで使用される周波数基準のための Si ベースの MEMS 発振器で、従来の水晶振動子を置換しようとしている。Si ベースの MEMS 発振器は、耐衝撃性、小型フォームファクタの利点があり、大量生産に適している。MEMS 発振器は、水晶発振器よりもはるかに小さいパッケージにタイミング回路と統合することができる。

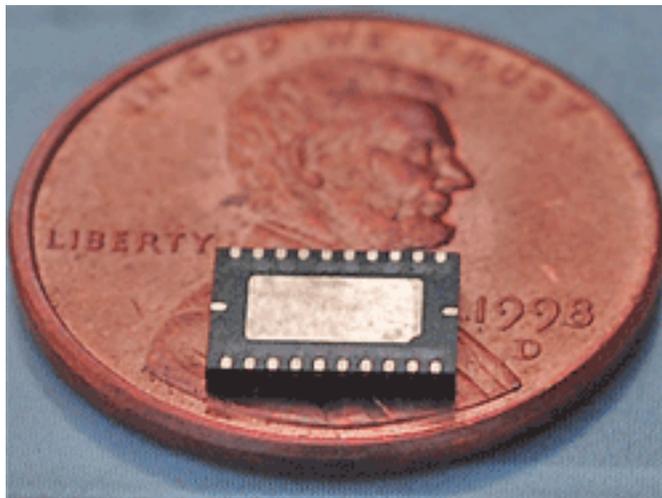


Figure MEMS7

The Si Time SiT9104 provides six single-ended clock outputs, two from each PLL, which can operate at up to 220 MHz. Each PLL and associated pair of clock outputs can be driven by independent voltage supplies (1.8, 2.5, 2.8

or 3.3 V), and each output pair on the differential output SiT9103 can be configured to one of three signaling levels, LVPECL, LVDS or CML.<sup>6</sup>

### 1.4.2 RF MEMS SWITCHES

RF-MEMS の接点スイッチは、パフォーマンスを向上させ、RF ワイヤレスシステムのフロントエンドの統合を高めるための非常に有望なものである。RF-MEMS スイッチは、固体のコンポーネントより、はるかに低損失、高アイソレーションで、かつ、高い直線性を提供することができる。これは、モバイルプラットフォームが成長し続ける為に必要とされる、バンドとモードの数の増加の維持という価値がある。標準 CMOS で可能なモノリシック集積が可能であれば、低コストと小型化が実現できる。多くの高性能デバイスは、広帯域のスイッチを含む RF-MEMS が使用されている。しかしながら、技術的なチャレンジが残っている事と従来のスイッチング技術の急速な進歩の両方により、未だに、商業的な成功にまでは至っていない。

### 1.4.3 RF MEMS VARACTORS

RF-MEMS バラクタと容量スイッチは、RF ワイヤレスシステムのフロントエンドの性能と統合を向上させることに非常に有望である。固定素子群によるスイッチングの代わりに、RF-MEMS バラクタは、RF 回路を直接調整することができ、固定受動素子と同様の損失特性を示す。これは、信号経路の多重度の低減によるシステムの簡素化を可能にする。これらの利点を達成するためには、シンプルなスイッチングよりも複雑な制御を必要とする。アナログの MEMS バラクタは、温度ばらつきや RF 電力によって誘起される電圧の影響によって、ほとんどのアプリケーションで実用的でないという事に注意する必要がある。実用的な RF-MEMS バラクタは、通常、必要な再現性と信頼性をもつ静電容量スイッチアレイで構成されている。技術は RF-MEMS の接点スイッチに似ているが、決定的な違いがある。標準的な CMOS との混載が、根本的により簡単であり、すでに実現されている。静電容量スイッチは、RF パワーの下でのスイッチングより信頼性が高く、接点スイッチよりも、はるかに長いサイクル寿命がある。

## 2 DIFFICULT CHALLENGES

MEMS 技術に関する研究開発投資の調査においては、多くの投資が、デバイスとプロセス開発における製造フローの、フロント・エンドで実施されているという分析があります。結果として、MEMS 製造企業は

、MEMS デバイス開発に対して、多様な手法とツールを持ちます。この報告書から、MEMS デバイスは、一般的に言って、性能面では継続的な進歩を示し、パッケージサイズとコストでは継続的な減少を示します。MEMS 技術における最大の課題は、集積化に関するものであり、主に、パッケージやテストなどのバック・エンドに関する内容です。モバイル・インターネット・デバイスの製造企業は、サイズと重量を小さく、バッテリー寿命を長く、そして各種の新機能を集積化しようと務めます。その開発の方向性が、MEMS デバイスの製造企業に対しても、より小さなパッケージサイズと集積化を促します。MEMS デバイスの製造企業は、マルチモーダルセンサー技術の集積化を参考にしています。課題は、3軸の加速度、3軸のジャイロ、3軸の磁力計(コンパス)と、1つの圧力センサ(高度計)の合計10自由度を持つ MEMS 慣性計測ユニットを作り出すことです。この10自由度を持つマルチモーダルセンサー技術への要求は、主にバックエンドの技術領域における課題となります。

<sup>6</sup>From *Electronic Products* published on July 22, 2011

## 2.1 ACCELEROMETERS

MEMS加速度センサーチップはモバイルインターネット機器にとって当然の存在となっている。それらにより、自動画面回転の検知が可能となり、その用途は、成長するゲームアプリケーション等、広がってきている。民生アプリケーション用の3軸MEMS加速度センサーは、さらなる性能向上が期待されている。向上を期待されている性能は、解像度およびバイアス、ドリフトであり、解像度については2015年までに $1000\mu\text{g}$ を2倍の $500\mu\text{g}$ に向上させることが期待されている。MEMS加速度センサーにとって最も大きな課題は、2017年までに1素子あたり0.5ドルから0.2ドルへのコストダウンである。多くのモバイル機器のGPSユニットは、場所の特定、移動軌跡確認のため使用されている。しかしGPS信号がトンネル内やビル内もしくは干渉により使用不可能な場合にはIMU(慣性計測装置)が必要となる。IMUは3軸加速度センサーおよび、3軸ジャイロスコップ、3軸磁気センサー(電子コンパス)、圧力センサーから構成されている。現在のMEMS技術では、IMUを基板レベルで製造することが可能である。加速度センサーが直面している最も大きな課題は、パッケージレベルのIMUの統合であり、さらにはチップレベルの統合である。

## 2.2 GYROSCOPES

モバイル機器へのジャイロスコップの搭載は、アップルの第一世代iPhoneのような初期モデルと比較して、より詳細なユーザーの動きの検知を可能としている。MEMSジャイロスコップは、加速度センサーと比較してパッケージストレスの影響を受けやすいことや、精度の高い大きい駆動、高信頼の真空パッケージングが必要なことから、モバイルアプリケーションに適合するための大きな技術的課題に直面している。その結果、加速度センサーに比べて商用化が遅れ、価格もかなり高い状態であった。ジャイロスコップは性能の、特に解像度とゼロGバイアスレベル性能の、さらなる向上が期待されている。3軸ジャイロスコップにとっての主な課題はコストダウンとパッケージサイズ縮小に関するものである。しかしながら、直面している最も難しい課題は加速度センサーと同じように、IMUへの統合である。

## 2.3 MICROPHONES

MEMSマイクが市場に登場して以来、サイズのスケールダウンと性能向上の両者を実現し続けています。また、それは同時に、全体的な数量増加と価格ダウンの傾向とも符合しています。さらに将来も同様とらえられています。ダイサイズのシュリンク、ダイのスタック(積層)、そしてチップスケールパッケージ技術によるアプローチが、今後10年間も、これまでと同様にマイクのダウンサイズをリードし続けていくでしょう。同時に、消費者向け電子機器メーカーは、より高性能なマイクを要求し続けます。従来よりも高いSN比(信号対雑音の比)がマイクに要求されています。それは、主に、耳そばの会話対応、スピーカーフォン、そしてビデオ録画など、従来の一機の携帯電話でのユースケース以上の要求を満たす必要があるからです。広い帯域を有すマイクは、VoIP(ボイス・オーバー・インターネット・プロトコル)のみならず、音声と音楽の両者を記録するビデオ録画同様に、より広い帯域の携帯電話ネットワークへのサポートが重用視されています。より小さなマイクは、単一のマイクの使用では無く、ステレオ録音や、ノイズ抑制の為に複数のマイク利用などの、携帯電話などのより機器サイズが小さい製品での新しいアプリケーションをサポートする為に必要とされています。加えて、マイクの小型化は、大量供給とコスト感覚がとてもし消費者向けエレクトロニクス市場において、アグレッシブなコストダウン目標を実現する上で必要となります。特に、単一の機器に複数のマイクを採用する場合にはなおさらその要求は大きくなります。これら将来の需要予測に基づき、マイク製造メーカーは、今後10年間の技術革新をサポートしなくてはなりません。

マイクは、実現する機能(例:ノイズキャンセル)向けシステムの周辺に配置する必要があります。その為、一つのパッケージに複数のマイクを集積化するソリューションが有効では無いケースも出てきます。代わりに、長い信号線を介するシステム構築において有効な、ノイズ低減のI/Oインターフェース開発が検討されています。

MEMSマイクは、サイズとコストを低減しながら、性能の継続的な向上が期待されています。マイクに向けた集積化は、先進的なASIC機能とI/Oに関する統合への方向が予測されます。

## 2.4 RF MEMS

モバイル機器に RF-MEMS を取り込みことは、無線通信によって浪費する消費電力の低減やデバイス数の削減を意図している。

RF MEMS がモバイルデバイスとして搭載されるに前に、まだ、信頼性の向上や低価格化が必要である。その性能と信頼性は、まだまだ改善されると期待される。最大の課題は、信頼性と(たとえば、# 回操作の)繰り返し寿命の改善である。将来の性能品質の中には、たとえば、信号分離要件のように、まったく解決法が知られていないものもある。

### 2.4.1 RF MEMS RESONATORS

MEMS 共振器は、本質的に石英よりも高い温度膨張係数を持ち、したがって、それは、適切な補償なしには、温度上昇による高い周波数ドリフトを持っている。タイミング回路と低ノイズ PLL と一緒に使用する MEMS 共振器には、安定したタイミング基準を作るために、適切な温度補償方式が必要である。MEMS 発振器の製品は、アプリケーションの周波数範囲および統合ソリューションの位相ノイズとジッタのレベルに応じて異なるものとして作られる。位相雑音と位相ジッタの主な原因は、補償ループ、PLL 回路から来ている。これらは、MEMS 発振器のもっとも大きな性能開発を必要とする領域である。携帯電話のアプリケーションでは、消費電力が常に問題となる。これは、位相補償と PLL 回路の設計に多くの課題を生じる。携帯電話アプリケーションに見合う低消費電力で、2ppm 以内の位相ノイズとジッタを持つ Si ベースの MEMS 発振器はほとんどない。

### 2.4.2 RF MEMS SWITCHES

RF-MEMS スイッチの実用化にはいくつかの重要な課題がある。第一の関門は、従来のスイッチングソリューションに対して十分に競争力のある低価格を実現する事である。一番のコスト要因は、水分や有機汚染から MEMS との接触面を保護するために必要な、完全気密、または、気密に近い密閉包装である。このパッケージは、優れた RF 性能への影響を最小限に抑える必要があり、また、標準的な半導体バックエンド・フローとの互換性が必要である。もう一つの重要なコスト要素は、ダイサイズを最小化し信頼性を最大化するために必要な、高電圧を生成し制御する回路である。これらの回路は、無視できるほどわずかな消費電力で、標準的な制御インターフェイスをもち、あらゆる RF 干渉を避けなければならない。コストパズルの最後のピースは、理想的には 200mm 以上のウェーハで、高歩留りを達成することである。

もう一つの重要な課題は、それらが適用される環境範囲で、アプリケーションのユースケースに必要な信頼性をはっきりと実証することである。限られたサンプル量であれば、多くのアプリケーションで十分な寿命が直接長期試験を通じて実証されている。これらのテストは、RF-MEMS スイッチの接点が必要とされる信頼性が達成できる可能性を示すが、特に初期段階での、量産での欠陥予測をするための十分な統計的な基礎が確立されていない。いくつかの加速信頼性試験が提案されているが、残念ながらどれもまだ実証された妥当性を持っていない。サイクル試験での信頼性は、特にホットスイッチングによって影響を受ける。モバイルアプリケーションの新しいソリューションでは、フルパワーで接触スイッチングを可能とする必要がある。テクノロジーによっては、メタルの機械的な降伏やストレスによるクリープ現象が不可逆な動作シフトを起こしたり、アクチュエータの短路を防ぐための誘電体が帯電したりするような、追加の信頼性限界が引き起こされることもある。

いくつかのアプリケーションでの最終的な課題は、閉接点での抵抗値の高い再現性の実現である。接触面上の、特に有機の、残留膜がばらつき増加につながる。

### 2.4.3 RF MEMS VARACTORS

アプリケーションの価値と性能要求により、多少はコスト基準が高いものの、スイッチ等と同じように、第一の課題は、コストの観点である。パッケージングはスイッチと違い、RF 寄生容量の低減と水分防止が主たる課

題となる。Waferでの薄膜シール技術は良い解決策ではあるが、より小さな寄生容量でバンド幅を広げ、射出成型のような過酷なパッケージングでも生き抜くシール層の信頼性を確保する開発が必要である。

誘電体の帯電は、特に多くのRF-MEMSバラクタでキーとなる信頼性限界であるが、特に制御電圧を容量に直接与えるタイプでは顕著である。これは非常に残留水分の影響を受けるので、湿気の侵入を防ぐ封止が必須である。

ホットチューニングは容量スイッチの信頼性の制限はないが、電圧が低下するまで、デバイスはOFFしないので、閾値を越えたRF電圧でのスイッチング動作は影響を受ける。高い電圧で、デバイスが意図せずに閉じることもある。

### 3 TECHNOLOGY REQUIREMENTS

ITRSは、短期(5年)と長期(10年以上)両者への、技術要求へのロードマップとして知られています。しかし、MEMSに関するロードマップ策定活動は、新しい取り組みである為、委員会は、議論の焦点を短期、つまり2017年までの期間で設定しました。委員会は、長期に対するロードマップの調査に関しても、同様の手法を将来に繰り返し適用しようと試みました。しかし、MEMSデバイスは、集積回路と同様のスケールリング則を有しない可能性も有るため、長期における技術開発項目をどの様に予測するかという点から議論されねばなりません。MEMSのロードマップとして盛り込まれたデバイス技術は、加速度計、ジャイロ스코プ、マイク、RF-MEMS共振器、バラクタ、そしてスイッチです。これらのデバイス技術のトレンドは、ディスクリートデバイスとしての実装の観点と、集積化の方向性の観点から議論されています。一般的に共有されているディスクリートデバイス技術としてのトレンドは、継続的な性能向上、低コスト化、そしてパッケージサイズの縮小です。一般的な第二のトレンドは、集積化の方向性です。単一のパッケージに、複数のMEMSセンサを集積化する技術であり、ASICとI/O機能の進歩に関する技術です。MEMSテクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)は、デバイス性能と集積化の方向性に関して、技術要求テーブルの開発に関与しています。MEMSが直面している最大の課題は、製造工程のバックエンド(それは、パッケージとテスト工程です)と認識されていました。委員会は、デバイス性能テーブルを、プロセスの最後から技術要求を決めていく事にしました。それは、テスト工程を起点として、製造工程を逆にたどり、パッケージング、集積化、そして最後に設計とシミュレーションです。ロードマップは、ディスクリートMEMSデバイスと、集積化MEMS技術に関する適切な情報も含んでいます。ディスクリートMEMSの“ディスクリート”という言葉は、単一の機能を実行するデバイスを示すのに用いられます。例えば、ASICと集積化された3軸加速度センサーは、この議論においては、ディスクリートMEMSと分類されます。同じ理由から、同一パッケージ内にASICチップが実装されたMEMSマイクロフォン・チップは、定義としては、ディスクリートMEMSと分類されることになります。我々は、集積化MEMSデバイスを、複数の機能が統合されたセンサーを指すと定義します。例えば、同一パッケージ内に納められた加速度計とジャイロ스코プを持ったセンサーデバイスです。それらの実装方法は、パッケージレベルの場合もあれば、ウエハーレベル(3次元的な積層方法)、モノリシックなチップレベルの場合もあるし、それらが組み合わさった実装の場合もあります。具体的なアプローチは、おそらくメーカー毎に異なりますし、また、最終的にはコストで決定されます。

#### 3.1 ACCELEROMETERS

表1に3軸加速度センサー単体とIMU統合に対する技術要求を示す。3軸加速度センサー単体としてはパフォーマンスの継続的改善を求められている上、一方同時にさらなるパッケージサイズ、コストの削減を求められている。加速度センサーのパフォーマンス改善としては解像度、バイアス、ドリフト、消費電流などでありこれらは既存の問題ですすでに最適化が行われている。しかしながらそれらの挑戦は2015年始めまで未知のコスト削減、パッケージサイズの要求にミートさせるため続くであろう。インテグレートドMEMSセンサー(加速度、ジャイロ、磁気、圧力センサー)は2015年には1パッケージで10軸を可能に、2017年にはウエハ

ーレベルもしくはチップレベルへの統合が期待されている。当面の解決策としては装置として組み立てることである。これらのデバイスにとって最も大きなチャレンジはテストである。パッケージレベル10軸MEMSの当面の測定方法はKGDの測定をベースにしている。しかしながらこれらの方法はまだデバイスの歩留りに関して大きな関心を持たれている。この問題はウェハーレベル、チップレベルに統合された10軸がやってくる2017年にはさらに悪化するであろう。

*Table MEMS1*

*MEMS Accelerometer Technology Requirements (LINK)*

### 3.2 GYROSCOPES

表2に3軸ジャイロ単体と統合されたIMUに関する技術要求を示す。3軸ジャイロ単体においてはパフォーマンスの継続的改善、それと同時にパッケージ、コストの低減が求められている。ジャイロ単体のパフォーマンス改善として第一に解像度であり、これは既存の問題ですでに最適化が進められている。しかしながら未知のコスト削減、パッケージサイズの要求に応えるというチャレンジは2015年始めまでにはミートできるだろう。インテグレートMEMSセンサー(加速、ジャイロ、磁気、圧力)への統合は加速度センサーが歩んできた同じチャレンジに直面し、同じ道を歩むであろう。インテグレートMEMSセンサーは2015年までに10軸を1パッケージで、2017年までにはウェハーレベル、チップレベルへの統合が望まれている。当面の解決方法としては装置として組み立てることである。そして加速度センサー以前の問題として最も大きなチャレンジはテストである。10軸のパッケージレベルのMEMSを測定する暫定方法としてはKGDをベースとするものである。しかしながらこのアプローチは歩留り問題が依然として存在する。この問題は未知のウェハーレベル、チップレベルに統合された10軸のテストが必要となる2017年までにもっと悪化するであろう。

*Table MEMS2*

*MEMS Gyroscope Technology Requirements (LINK)*

### 3.3 MICROPHONES

テーブル MEMS3 は、MEMS マイクの技術要件について説明している。MEMS マイクは、性能向上、特に SN 比、周波数応答、そして消費電流削減が期待される。いくつかのメーカーが感度 UP に努力しているが、これは他のパフォーマンスメトリックとのトレードオフになる。メーカーは、ソリューションがこれらのパフォーマンス・メトリックを達成すると信じている。

マイクは、システムとしての機能でも貢献する(例えば、ノイズキャンセル)。このため、単一のパッケージに複数のマイクを実装することや他のセンサーと一緒に統合する事に魅力はない。代わりに、内外信号線を介してノイズを低減するデジタル I/O インターフェイスの開発は魅力的である。このように、マイクのインテグレーションは、先進的な ASIC や I/O 機能の方向に向かっている。その詳細は、商業的利益への影響もあり、表立っては議論されていない。

*Table MEMS3*

*MEMS Microphone Technology Requirements (LINK)*

### 3.4 RF MEMS

以下のセクションで見られるように、RF MEMS デバイスはどれも、パフォーマンスの継続的な改善を期待されている。モバイル・インターネットで使用されるデバイスとなるための RF MEMS の横断的な主要課題は信頼性、つまり、信頼性の向上、信頼性シミュレーションツールの開発、加速寿命試験方法の開発、である。また、Q> 50 以上でインテグレートされたインダクタに対する要件や、パッケージレベルでの相互接続の長さや負荷を最小限にするためのメソッドも明確な課題である。

### 3.4.1 RF MEMS RESONATORS

テーブル MEMS4 は、RF MEMS 共振器のための技術要件について説明している。これらのデバイスが意図しているアプリケーションはタイミングであり、従来のディスクリートな水晶ベースのタイミングデバイスを、IC パッケージ内、またはチップ上でインテグレートできるシリコンベースの技術で置き換えようとしている。RF MEMS 共振器はパフォーマンス・メトリックのすべての継続的な性能向上が期待されている。最大の課題は、温度安定性、位相ノイズ、消費電流低減の要件を達成することで、2016 年までは解決は難しいと思われる。

[Table MEMS4](#)

[RF MEMS Resonator Technology Requirements \(LINK\)](#)

### 3.4.2 RF MEMS SWITCHES

テーブル MEMS5 は、RF MEMS スイッチの電氣的技術要件について説明している。RF MEMS スイッチは、パフォーマンス・メトリックのすべての性能の継続的向上が期待されている。最大の課題は、温度安定性、位相ノイズ、消費電流低減の要件を達成することで、2016 年までは解決は難しいと思われる。

[Table MEMS5](#)

[RF MEMS Galvanic Switch Technology Requirements \(LINK\)](#)

### 3.4.3 RF MEMS VARACTORS

テーブル MEMS6 は、RF MEMS バラクタのための技術要件について説明している。RF MEMS バラクタは、パフォーマンス・メトリックのすべての継続的な性能向上が期待されている。パフォーマンス・メトリックの課題は、2014 年までは解決は難しいと思われる。

[Table MEMS6](#)

[RF MEMS Varactors Technology Requirements \(LINK\)](#)

## 4 POTENTIAL SOLUTIONS

MEMS Technology Working Group (TWG) が、新しく組織され、横断的な議論が始まりました。MEMS は、その技術要求を開発し、ニーズとギャップを整合して、可能性のある解決策を提案するだろう、と TWG の意見が一致しました。これらは、TRS TWG 間で議論のための土台になります。このセッションで示された、既知の解決策でない、可能性のある解決策は、解決策への課題と、可能性のある方向性を提案することから始まります。どのように課題に対応するか、というコンセンサス(総意)に発展させるため、この情報は、横断的 TWG 間の議論に提供されます。

### 4.1 DESIGN AND SIMULATION

MEMS のための設計とシミュレーションツールの進化は、製造方法や伝達メカニズムと同じくらい多岐にわたり、幅広いものになります。横断的な多くの自然科学分野(生物学、光学、化学を含む)の設計ツールやメトロロジー(methodology: 方法論)は、トランスデューサ(変換器)、センサや、より生産数量の多い製品(例えば、電気機械的に動作する加速度センサ、ジャイロスコープ、圧力センサ)を生み出した機械工学、電気工学のコア領域に焦点を当てています。設計による解決策は十分に発達しましたが、解決の方向性が多岐にわたりました。最終ニーズに対応するカスタム化が重要で、材料科学、製造技術や様々な幾何学的スケール(geometric scales)が効果を示し始める、機械工学では、CoventorWare や ANSYS のような有限要素モデル(FEM)ソリューションが要求されます。モジュール化として標準化が重要な、電気工学では、SPICE、Verilog や VHDL のようなシステムレベル(ECAD)ツールは、回路解析と VLSI 設計にとって重要になりました。標準化とカスタム化の隙間を埋めることが、MEMS の長年の課題でした。

### シミュレーションツールの絶え間ない改善

MEMS デバイスは、パフォーマンス基準の絶え間ない、追加改善を期待されています。シミュレーションツールも、MEMS デバイスの特性向上を予測する能力を、絶え間なく改善しなければなりません。これにはデバイスシミュレーションとシステムシミュレーションのリンク(結合)を改善する必要があります。より具体的には、ECAD ツールでの有限要素モデルの統合です。材料特性、プロセス起因の表面特性と応力場(stress fields)はプロセスフローからより正確に予測されることできるように、製造プロセスのモデリングも進めるべきです。

### テスト容易化のための設計

MEMS デバイスの重大な課題はテストに関することです。デバイス価格が下落し続けているのに、テストコストは、既に製造コストの 1/3 を費やし、上がり続けています。さらに、集積化 10DOF (degree-of-freedom) マルチモード MEMS は、テストに関して、既知の解決策がありません。新しいデバイス設計 プロセス開始時点でパッケージの考察を必要とするというマントラ(mantra:真言)が MEMS コミュニティ内にあります。今、設計開始時点でテストのための設計の必要性を含めるため、このマントラは展開する必要があります。テストのための MEMS 設計をする正式なアルゴリズムはありません。特に、集積化マルチモード MEMS センサもそうです。委員会の統一見解は、できるだけ多くのテストがプロセスの上流で行われるべきで、設計ツールがこれをサポートするために必要である、ということです。「テストをしないための設計」の要請もあり、その研究により、さらにセルフテストとセルフキャリブレーションを行うシステムを設計する技術が可能になるかも知れません[12]。

### ウエハレベルテストからパッケージされたデバイス性能を予測するシミュレーションツール

製造業者は、一般的に、完全に組立、パッケージされた後でデバイスのテストを行い、これをデバイスレベルテストと称しています。テストの課題で重要なのは、ウエハレベルで可能な限り多くのテストを行い、最終工程でのテストの負担を単純化して、減らすことです。これには、ウエハレベルテストのデータから組立とパッケージの影響を予測することができるシミュレーションツールとメトロロジー(methodologies)が必要です。

### 信頼性シミュレーション

MEMS の信頼性を予測して、最適化するために、設計や製造プロセスからの情報を使った精密な予測モデルが必要とされています。これらのモデルも、加速信頼性試験方法を開発するのに役立つかもしれません。この要求に取り組むには、研究と故障の物理学に関する知見の進歩が必要で、そのために、モデルは開発されます。

### パッケージと集積化のためのコストモデリング

コスト分析は、MEMS コンポーネントの将来予測価格が、市場に投入するのに必要な資源や技術と一致していることを確認するための重要な手法です。現在では、この手法は、個別の MEMS デバイスのコスト/価格を決めるのに有効に活用され、直近に必要な生産展開を予測することができます。MEMS の集積化指針の予測モデルを進めることは、長期に渡るテクノロジーロードマップを作るのに役立ちます。

## 4.2 PACKAGING AND INTEGRATION

MEMS デバイスの実センサ領域をシリコンキャップを使って密封することにより、過去 10 年間で、MEMS センサは急激に進歩しました。これにより、パーティクル制御、密封パッケージの要求など、初期課題が減りました。MEMS デバイスのセンサ領域をキャップしても、MEMS のストレスに敏感な性質のため、すべての MEMS 製品に低コストプラスチックパッケージをすぐに使えませんでした。現在でも、これは、とりわけ既存の MEMS ジャイロスコープの多くに当てはまります。しかし、シリコンでキャップされた MEMS 加速度センサは、標準的なプラスチックパッケージを使用出来るようになりました。これにより、製品コストが次々に下がり、ゲームコントローラ(任天堂 Wii で採用された)、PC、携帯電話のようなコンシューマ向け製品での、

MEMS 加速度センサの使用量が急増しました。新しいパッケージ設計、材料とプロセスは、これら MEMS パッケージの課題に対応するために、未だ開発され続けています。

#### コスト低減

MEMS デバイスは、絶え間ない特性向上を期待されていますが、それと同時に、パッケージサイズ縮小、コスト低減も要求されています。個別の MEMS デバイスの最大の課題は、既知でない解決策を適用して、パッケージサイズの縮小、コスト低減を行うことです。組立/パッケージ技術、材料の進展がこの課題解決に欠かせません。

#### パッケージの標準化

MEMS 技術は、パッケージの標準化を求められています。これにより、コストは低減でき、それぞれの MEMS デバイスのためのカスタムパッケージというトレンドを抑制できます。3×3mm から 7×7mm まで、1mm 単位の空洞タイプパッケージを、多くの開発者たちは、提案しています。パッケージには、MEMS に対するストレスを正確にシミュレーションするのに必要な、全てのパラメータを掲載したデータシートが添付されており、ウエハレベルのテストで、パッケージされたデバイス性能を予測できるようにします。

#### 信号線のパッケージ標準化

MEMS が、ASIC の集積化と機能化として進展し続けるには、信号線の標準化とパワーハンドリング (power handling) が、ますます要求されます。マイクロコントローラ向けの集積化マルチモードセンサと、ASIC の発展から、この流れは来そうです。RF MEMS も、パッケージに集積された Q 値>50 のインダクタと、接続線長、負荷を最小化する手法、という特有の要求があります。

#### 3Dパッケージ技術(TSV)の進展

特に、デバイス性能のパッケージに起因する機械的ストレスと、パッケージの気密性に関して、MEMS は、現在の ASIC やメモリより多くの3Dパッケージへの要求があります。

### 4.3 TEST

MEMS デバイスのテストは、複雑で、高度な手法が要求され、いろいろな課題を伴います。これらのセンサのテストは、キャリブレーション (calibration: 校正) とバリデーション (validation: 検証) を含む一連の工程が必要になります。それらは、順番にパラメトリックな、且つファンクショナルなテストを実行するため、外部から物理的励振 (振動) を加えることが必要です。それぞれの種類のデバイスは、必要な励振 (振動) を供給できるテストシステムを必要とするだけでなく、どのようにデバイスに影響するか、どのようにデータが処理、分析されるか、という励振 (振動) の物理学が、これらのシステムのキーファンクションになります。これらの特徴を把握して、非常に少量のエンジニアリングシステムから大量生産用自動テスト装置 (ATE) まで適用可能なモジュールシステムが、現在、産業界が導き出している MEMS テストの方向性になります。

MEMS 市場を推進する大量生産と低コストを満たすため、産業界は、原価を下げて、利益を得る方法に関して、内部評価を行っています。コスト/デバイスに関して、最終的なデバイステストのコストの大きな要因は、主要な設備投資とテストタイムになります。このため、テスト体系のための設計を行うことは、MEMS メーカーの活動の焦点になりました。このテスト体系は、テストが容易に出来る特徴を製品に付加し、より効率的な開発と最終製品テストを順次可能にする、設計技術で決まります。

#### テストコスト

テストコストは騰がり続けます、それでも、デバイス価格は下がることを期待されます (耐え難い状況です)。MEMS デバイスには、電気的テストだけでなく、励振 (振動) の機械的テスト (揺さぶる、ガタガタ振動を与える、回転させる) も要求されます。これらの付加要求により、励振を与える、デバイスの反応をチェックする、

自動テスト装置の部品であるハンドラ(handlers)は、結果的に高価格になります。これらのハンドラは、それぞれのメーカーのためにカスタマイズされる傾向があります。ハンドラとテスト方法を標準化することにより、かなりコストを下げられるかもしれません。テストコストは、顧客からのテスト要求項目にも影響されます。これはコストを上げますが、少しの付加価値にもなり得ません。製品性能、信頼性、デバイスデータシートを基に、テストを標準化することにより、テストコストをかなり低減することができます。

#### ウエハレベルテスト –

##### ウエハレベルテスト –

統合化した10DOF (degree-of-freedom) マルチモード MEMS センサのテストは、既知の解決策がありません。そして、製造プロセスの最後にテスト(デバイスレベルテスト)を行う、標準的なアプローチを使って、解決策を開発することができるとは限りません。可能性のある解決策は、ウエハレベルで、できる限り多くのテストを行うことです。ウエハレベルテストからの情報からパッケージ後のデバイス性能を予測することができるように、組立とパッケージの影響を除外できる知見と、予想モデルが必要となります。目的は、完成デバイスの最終テストを、期待される特性の簡単な検証で行うことです。ウエハレベルテストは、設計と製品歩留まり向上のため、プロセス工程(設計者を含む)に測定データを提供するのに用いられます。

#### テストのための設計(テスト不要のための設計) –

これは、またセルフテスト/セルフキャリブレーション(self-test/self-calibration)に関します。このトピックスは、前記設計とシミュレーションの可能性のある解決策に関するセクションに記載されています。現在、製造の後工程でのテストの負担を減らすことができる、テスト容易性のための設計とセルフテスト/セルフキャリブレーション方法のノウハウが不足しています。テストのための設計は、非常にアプリケーションに依存するので、メトロロジー(methodology)はデバイス技術ごとに開発される必要があります。

#### 加速信頼性試験方法 –

MEMS デバイスの故障の物理現象の知見を継続的に広げる必要があります。これは特に、多くのアプリケーションへの採用を信頼性要件のために妨げられてきた、RF MEMS デバイスに重要です。故障の物理現象の知見を広げることにより、デバイスの信頼性を改善し、加速信頼性試験方法を開発することが出来るようになります。信頼性基準とテスト方法についての特定の知見は企業にあります、それを秘密にしておくことが企業の営業的な利点となるので、この情報は一般的に共有されません。そうでない場合、可能性のある解決策は、情報は共有し、相違点を見極め、それを要求する領域の知見を得るための研究開発を支援することです。それから、この知見は、標準化された加速信頼性試験方法の開発に適用できます。

## 5 CROSS-CUT ISSUES

MEMS TWG はアセンブリ、パッケージング、テスト、そして RF/AMS の各 TWG とのディスカッションを開始した。MEMS TWG はモデリングとシミュレーション、システムドライバ、デザイン、イールド、そして研究段階の新しいデバイスに関して他の ITRS TWG とのインタラクションを広げていく機会に恵まれていることを認識しており、ITRS において More-than-Moore を拡張していく。

### 5.1 ASSEMBLY AND PACKAGING

MEMS TWG は不足事項を抽出するため、将来的な MEMS パッケージに要求される仕様を決めることを目的として、デバイスパフォーマンスの測定法とインテグレーション手法に取り組んでいる。これは標準パッケージとデータシート、3Dアセンブリ方法、そして新たなマルチモードセンサ用の先進的パッケージを含む。ここからの要求はアセンブリ、パッケージング、そして MEMS 各 TWG のディスカッションの土台となる。我々の

初期の意図は、予期される先進的 MEMS 技術に対して、アセンブリ TWG とパッケージング TWG が、可能性のある解決方法を選択し調和よく組み合わせることである。

## 5.2 TEST

MEMS TWG は MEMS の試験のための必要条件と不足部分を決める。例えば10自由度のマルチモードセンサの試験の必要条件に対する解は無い。これらの必用条件はテスト TWG と MEMS TWG の間で可能性のある解決方法を決めるためのディスカッションの土台となる。いくつかの解決方法は先進的な試験装置を使用する可能性があり、デバイスレベルの試験をウエハレベルで試験を行なうこと、試験に配慮したデバイス設計を行なうことによりデバイスレベルでの試験要件を減らす方法を開発することも含む。

## 5.3 RF AND ANALOG MIXED SIGNAL

MEMS TWG は携帯電話用の RFMEMS の製造に必要な技術を決める。RFMEMS の最も難しい課題は、携帯電話用途に要求される使用期間において高い信頼性で動作するデバイスを製造するプロセス技術と試験方法を開発することである。MEMS TWG は RF やアナログ混載 TWG と協働して将来の携帯電話の RF 回路における MEMS への要求回路仕様のロードマップを作成し、早期の製品への適用を促す。

# 6 EMERGING MEMS FOR MOBILE APPLICATIONS

この章では、モバイル・インターネット・デバイスに将来採用される可能性を持つ新しい MEMS 技術の情報を提示する事が目的です。ここでは、光学フィルター、ピコプロジェクター、エレクトリック・ノーズ(鼻)、マイクロスピーカー、そして、超音波デバイスを紹介します。このワーキンググループでは、これらの技術が、いっより詳細なロードマップに取り込まれるべきかを議論、決定する為に、ここで評価を行っていきます。

## 6.1 OPTICAL FILTERS

携帯電話やタブレット PC 端末に搭載されている撮像素子といえば、主に写真撮影用である。文献[13]で Nayer が指摘しているように、撮影では本来さまざまな物理量を取得しているはずだが、実際に活用されているのは空間座標、時間、明度、色に限られている。これら以外にも、波長や偏光などの情報を画像処理に用いれば、撮像機能や画質の改善につながるだろう。たとえば、ハイパースペクトル撮像素子によって撮影時の詳細な照明状態を推測できれば、照明条件が変わったときの写真を画像処理によって生成できる。しかしながら、これらの機能を実現するには、コスト、寸法、実装の観点から、撮像素子に搭載されている色フィルタを根本的に考え直す必要がある。現在ではまだ研究段階ではあるが、CMOS の後工程技術を用いて偏光板や色フィルタ用のワイヤグリッド素子を撮像素子に集積化したり[14]、また、ベイヤーパターンに代わる素子として狭帯域のファブリ・ペロ干渉計フィルタ[15]を集積化する技術が開発されている。これらの開発例をみると、画像処理のアプリケーションごとに、それに必要な画像情報抽出に適した光学系を設計する手法が分かる。

長期的には、そのうちに写真撮影に関連するすべての物理量を計測できる単一の撮像素子の実現が考えられる。しかしながら、撮像関連の物理量は多岐にわたり、それらのすべてを実装することはチップ面積的に無理なので、画像処理アプリケーション毎にそれに適した物理量を得るべく撮像素子をチューニングする必要がある。この点において、MEMS は重要な技術となるだろう。

CMOS 撮像素子に集積可能な光学フィルタの例として、Figure MEMS8 に示すような MEMS による可変狭帯域フィルタが報告されている[16]。この例では、上下に一对のミラーを配置することでファブリ・ペロ干渉計型の光学フィルタを構成しており、上部ミラーを基板側に引き込むことでキャビティー長を制御し、透過光の

波長を選択する。このメカニズムに基づいた試作例がいくつか報告されているが、それらの多くは画素が大きい特殊仕様の赤外用途がほとんどであり、波長領域が狭く、また、波長可変範囲も限られている。

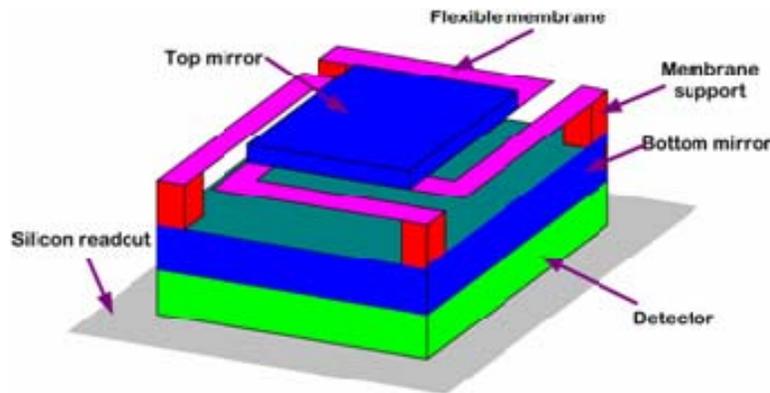


Figure MEMS8

A MEMS Narrow Band Tunable Filter. エラー! ブックマークが定義されていません。

撮像素子製品に MEMS を搭載するためには、下記のような課題がある。

- 透過光の中心波長を高精度で制御するには、上下ミラー間隔を 5nm 以内で精密に位置決めする必要がある。
- 携帯電話用の撮像素子面積は小型である。MEMS では上部ミラーを機械的に支持するための機構が必要であり、これが画素のフィルファクタを最大化する際の課題となる。
- 長期的には、撮像素子をよりアダプティブにするために、個々の画素に可変光学フィルタを搭載すべきである。ただし、これらは同一特性のフィルタ素子である必要はない。しかしながら、このような光学フィルタの実現には、上述の課題2項目をクリアする必要がある。
- 波長領域 400nm～1000nm を低コストでカバーするためには、可変範囲の広いミラー駆動機構の開発と、MEMS に適した材料の選択が必要である。
- 分解能を最大化するためには、ミラーの平行度とその間隔を撮像デバイス面内で均一にする必要がある。
- モノシック集積化するには、MEMS 駆動用の高電圧が撮像素子の信号に影響を与える恐れがある。
- 波長フィルタの特性として、入射光のごく一部のエネルギーのみが透過する。このため、通常のシャッタースピードとSN比で撮影するためには、より高効率のレンズ系と光電変換素子等が必要となる。
- ハイパースペクトル撮像素子は従来の撮像素子よりも大量の波長情報を取得するため、より高速な信号処理系が必要となる。
- MEMS フィルタの下部ミラーと撮像素子表面との間で寄生光学フィルタが形成される恐れがあり、これが分解能を低下する要因となる。
- 小型、軽量化のために素子自体とパッケージの小型化が必要である。
- 信頼性

## 6.2 PICOPROJECTOR

この数年の間に、スマートフォンの機能拡張に対する要求は爆発的に増大している。携帯電話のエンターテインメント機能と、どこでも、いつでも通信できる機能はもはや当たり前ものとなり、おかげで、どこでも通信できて、かつ、楽しめるといった用途に関しては、ある程度はスマートフォンが PC に置き換わっている。スマートフォンの機能として、通話相手の動画像や、写真、プレゼン資料をもとの大きさに拡大して壁やスクリーンに投影し、情報を相手方とシェアするためにピコプロジェクタが果たす役割は絶大である。特に動画像は、ひとびとの体験共有本能に深く関わるものであり、将来的にはピコプロジェクタによってゲーム世界のバーチャル・リアリティ画像の投影にも使えるかもしれない。

3年前にテキサス・インスツルメンツがモバイル機器用の小型ピコプロジェクタ開発を公開して以来、デバイスメーカー各社はピコプロジェクタを搭載したデジタルカメラやビデオカメラ、メディアプレイヤー、組み合わせ機器を次々に開発してきた。その一方で、携帯電話メーカーの動きは遅かったようである。富士通とシャープではピコプロジェクタを搭載した携帯電話をリリースし、サムソンが最近になって似たような機器を開発したが、その後、開発の勢いが低下して、携帯電話用のピコプロジェクタは一時のオモシロ機能になった感がある。しかしながら、この業界のパイオニアであるテキサス・インスツルメンツによると、通信速度の速い4G世代のネットワークが登場し、無線データ通信サービスに段階的な価格帯が設定されるようになると、ピコプロジェクタ搭載の携帯電話が俄然現実味を帯びてきた。同社では、携帯電話にはカメラが標準搭載されるように、ピコプロジェクタもまた広く普及するとしており、2013年には数千万台/年のピコプロジェクタ仕様機器の市場を予測している。実際に、同社のDLPの売り上げは年に300%の割合で成長しており、20社から30品目以上のモバイル機器に採用されている[17]。ピコプロジェクタに期待を寄せているのはテキサス・インスツルメンツだけではない。Mark Fihn (Veritas et Visus newsletterの発行人)によると、ピコプロジェクタにはいくつかの技術的なハードルはあるものの、パッケージが小型でかつ大画面が見られる用途ではピコプロジェクタが勝者となり、巻き取り式や折り曲げ式のフレキシブル・ディスプレイは明らかに敗者であろうと予想している[18]。

現在リリースされている手のひらサイズのピコプロジェクタは、Figure MEMS9のように、テキサス・インスツルメンツ製の480x320ピクセルDLPを使用した低解像度のものが主流である[19]。これよりも高解像度のプロジェクタ開発では、ミラー素子の小型化にともなう光学的な回折限界を克服する必要がある。この方式以外にも、高解像度を目指した技術として、光スキャナを利用したプロジェクタ (Bitendo【訳者注：イスラエルのbTendo社の間違い。】、Pixtronix【訳者注：公開資料を見る限り、同社では光スキャナ方式は開発しておらず、MEMSシャッタ方式である】) や、回折格子型のライトバルブや可変ホログラフィック素子を用いた方法が知られている (Light Blue Optics、Silicon Light Machines【訳者注：デバイス方式と開発元引用の順番が逆である】)。特に、光スキャナ方式のピコプロジェクタは携帯電話内部に実装できるほど小さくできるが、現在ではまだ製品化の例はない。



Figure MEMS9 *TI's prototype USB picoprojectorHD Pico with 20 lumens, 640 x 360 resolution, a contrast ratio greater than 1,000:1, a true RGB LED wide color gamut and reliance on a low-power Pico DPP2601 2607 ASIC processor.*

ピコプロジェクタに求められる仕様は、実装面積の小型化、高解像度、低消費電力、高輝度である。

- 実装面積を維持しつつ解像度を向上するには、ピクセル寸法の小型化が求められるが、従来型のミラーを敷き詰めた方式では、回折限界による光学損失を改善する必要がある。
- 消費電力を維持、あるいは、削減しつつ輝度を上げるには、より高率な光源が必要である。また、ピクセルのフィルファクタを上げるか、ミラー材料の反射率を改善することにより、多少は輝度改善の効果もある。

### 6.3 ELECTRONIC NOSE

スマートフォンをはじめとする民生電子機器は、位置、動き、気圧、照度や音のような、より高い機能をもった物理量を計測する組み込みセンサーを搭載することで、次第に「状況認識」が出来るようになってきた。その一方、バイオ・化学物質と言った環境中の有用な情報の検出を行う小型デバイスは、(その快適で安全な生活を行うためには必須であるはずではあるが)まだないと言ってよい。事実、揮発性物質(VOC)の検出(すなわち匂いの検出)は、従来の視覚から化学物質、更に生体活性(これはしばしばVOCの放出の結果として起こる)を計測する理想的な非接触の検出手段である。しかしながら、多くの場合は匂いの標的物質はVOCの組み合わせであるため、それらを正確に分析出来る化学物質分析装置は、小型でも低消費電力でもなく集積化は困難である。別のアプローチとして、人間の鼻の機能を模倣した電子鼻と呼ばれる、VOCを指紋のように解析可能な実際に物質の分類が可能なシステムがある。そのような電子鼻(e-nose)は既に、品質管理や安全・監視分野で使われている。しかし現状の電子鼻システムは、その大きさや消費電力において十分ではない。個人用呼気分析は、ドーピングの初期診断や喘息のような慢性疾患に有効と考えられている。スマートフォン内の空気品質モニターは、特に特定の疾患を持つ個人にとっては、有害な環境から避けるように警告するのに有効である。そのような拡大する要求に関しては、小型でアレイ化出来、低消費電力で集積化の可能な技術が、特定のアプリケーション条件にカスタマイズできる点で有効である。

Table MEMS7に、(個人的な研究であって制限はあるものの)電子鼻への応用が可能な、最近の幾つかのアレイ化可能なセンサー技術を纏めた。明らかにそれらの手法は、個人携帯機器に組み込む集積化電子鼻の要求を、全て満たすものではない。しかしこれらのMEMSによる検出手段は、上記制限を解決する候補として次第に表面化されてきている。原子間力顕微鏡から派生したカンチレバーは、ポリマーによって機能修飾されて静的・動的(共振的)動作で実現される(i-ii, 20-21)。水晶発振器を用いた慣性センサーは、集積化可能な製造技術を用いて再参入した。最も有効な手段の一つと考えられる、ポリマーをコートした容量型ポリマー被膜メムセンサースは、サブPPMの感度を示している(iii, 22)。ここでMEMS製造技術を用いた場合の製造再現性や、その小型化の有用性は、感応膜をコーティングした大規模アレイの共振器の構成に活用される。ここでそれらの並列接続は、サイズや消費電力を押し上げるコスト高以上に、回路特性の改善に寄与する(iv, 23)。

一方では熱駆動型のMEMS面内ディスク型振動子では、スクイーズ流体ダンピングの問題を解決するが、新たに消費電力の問題がある(v, 24)。重力場の下で利用される低分子量の物質の検出限界を上げる方法として、ストレス誘起共振周波数の変化を検出する方法が開発された。それは低消費電力のマイクロブリッジ型ピエゾ共振器にポリマーをコートした構造で、成分吸収時のボリューム変化応答を示した(vi, 25)。

このようにモバイル機器に埋込み可能で、それらの応用に性能メリットが出せそうな、沢山の電子鼻技術が成熟してきた。更に、複数の受容体センサーを搭載することを前提に、読み出し回路を含めて1cm平方の小型化と、サブmWの低消費電力化が重要な要求である。これらのスペックは、センサーノードとしてのシステムレベルの最適化に対して明らかに重要な要求である。化学および電気機械的な変換、電気的な読み出し等のシステム的な複雑さは、挑戦的な学際融合分野における最適化研究への急激な導入を促す。それ以上に、変換装置上での化学的な相互作用の複雑性は、検出物質の検出モデルの欠落を引き起こす。そのような、意味のある重要な実験データの積み上げが、システムの深い理解を得る努力として欠かせない。また確立された要求や堅牢な計測手段は、様々な化学条件の下での評価へ応用される。

Table MEMS7

## Sensing Technologies Suitable for Electronic Nose Devices

(adapted from A.D. Wilson and M. Baietto<sup>[1]</sup>)

センサータイプ	利点	欠点
カロリメトリック触媒ベース	高速応答、高速回復、酸化性成分で高感度	高速応答、高速回復、酸素を含む成分のみで高感度
触媒電界効果型センサー	小型、安価な検出手段	環境制御、基線ドリフト、アンモニアや二酸化炭素に対して低感度
導電性ポリマーセンサー	室温検出可能、多くの VOC に感度、短時間レスポンス、多くの感応膜、低価格、安定(劣化が少ない)	酸化によるドリフトや寿命限界、湿度や温度、飽和度、大きさ等に敏感
電気化学センサー	室温検出可能、低消費電力、多くの VOC に高感度	酸化によるドリフトや寿命限界、湿度や温度、飽和度、大きさ等に敏感
電気化学センサー	室温検出可能、低消費電力、多くの VOC に高感度	デバイスが大きい、低分子のガスに感度が低い
金属酸化物半導体(MOS)	極めて高感度、検出幅が狭い、高速応答	高温検出、消費電力大、感応膜の制限、湿度に敏感、精度が悪い
光学センサー	極めて高感度、混合ガスであっても、同定が可能、マルチパラメータ検出可能	複雑なセンサーアレイシステム、高コスト検出、光学+電子手段の為に可搬性が悪い
水晶マイクロバランス(QMB)	十分な精度、多種類の感応膜可能、高感度	不十分な S/N 比、アレイ化困難、低分子のガスに感度が低い、小型化困難
表面弾性波デバイス(SAW)	高感度、高速応答、多種類の感応膜可能、小型、様々なガスに感度を持つ	複雑な回路、大きな電力
有機薄膜トランジスター	複数パラメータでの検出可能、低コスト	感度、感応膜材料と検出成分の整合性の課題、寿命、検出原理が十分把握出来ていない、複数パラメータ検出回路が複雑

理想的な電子鼻の構成は、全ての検出成分に感度の異なる違った感応膜を用いた、単一電子変換手法であることは明確である。これは集積化を圧倒的に優位にさせ、読み出し回路が簡単になる。しかし多数の成分に対応する、感応膜の一般的なコーティング技術の獲得は、時間のかかる研究である。現在、インクジェットコーティング手法がMEMSベースのバイオ・化学センサー感応膜や受容体材料の迅速コーティングに最適と考えられている(viii,27)。しかしながら、センサーの大きさに合うロバストな放出プロファイルを持った、十分微小な粒滴を開発する挑戦は依然継続している。更にコーティング材料の種類の高さも、ロバストなコーティングレシピの開発を複雑にしている。最後に、電子鼻の実装は革新的なアプローチが要求される。環境中の化学物質を捉える接点が必要であるため、現在のMEMSハーメチックシールは明らかに適用不可である。更に、その実装形態はダスト、液体や環境の有害作用から、保護されるものでなくてはならない。これには新規な実装形態の開発が必要であり、感応膜の多様性から熱過程(サーマルバジェット)や使用する薬品等の制限も考慮する必要がある。

総じて、携帯機器への応用に対して集積化、小型化、電子鼻システムのカスタマイズといった明確な要求がある。増加しつつある新規な MEMS によるアプローチは、小型化電子鼻の要求を満たすものでなくてはならない。MEMS 手段がそれらの約束を果たす為に、幾つかの技術的な挑戦を乗り越えなくてはならない。MEMS 共振器の小型化は、その信号レベルが、その寄生素子や MEMS デバイスの周辺構成、読み出し回路に強く依存するために、その読み出し回路技術は重要な挑戦を強いられている。更に、特定の応用における効果的で小型化対応のコーティング技術と、実装の選択や開発も必要である。しかしながらこの現在の比較的早期の開発段階であっても、環境での化学的な状況認識が可能な開発中のデバイスとして、微小機械システム(MEMS)は明らかに重要な候補となっている。

## 6.4 MICROSPEAKERS

スマートフォン・メーカーは(他のコンシューマ製品メーカーとともに)、周囲の環境や状況を認識できるように、かつ本体の中(単位体積もしくは単位面積当たり)により多くの機能を備えるために、物理的(または化学的)な入力を検知する MEMS センサを初期から採用してきた。採用されている MEMS センサの最も一般的な検出対象は位置、動き、圧力(高度測定用)、温度、磁界(電子コンパス用)、湿度、光(景色用)、音(マイクロホン用)である。これとは対照的に、RF スwitchングデバイスやプロジェクタ、音響用スピーカのような MEMS アクチュエータはまだほとんど採用されていない。

マイクロホンやスピーカといった音響用変換器は明らかにスマートフォンの本質的かつ必須な構成要素である。スマートフォンの「サイズ問題」と電子機器メーカーは音響要素の小型化を促している。MEMS 技術は、複数の部品とオンチップ信号処理を実現すると同時に、前記小型化を達成するために実行可能な手段を明白に提供する。MEMS ベースのマイクロホンは 2006 年以来、既に携帯電話市場に採用されており、MEMS ベースのマイクロスピーカに対しても同様に携帯電話に採用される機会はある。しかし、現在でもスマートフォン向けの音響用スピーカは依然として精密力学に基づく従来技術によって作製されている。例えば、現在の先端エレクトロニクスは、直径約 15mm でピーク入力パワー1 ワットまで対応可能なスピーカの新製品を作製できる。金属フレームとマイラー振動板からなるその製品の対応周波数は 600Hz から 20kHz にもなる。もちろんこれはミニスピーカとしては素晴らしい前進と言えるものであるが、まだ大きくて厚いうえに工場の自動組立装置に合わない。そのため、製造スループットと歩留まりを向上させて、低コスト生産に繋げなくてはならない。

現在、市販されている MEMS ベースのマイクロスピーカはない。しかし、科学技術や特許文献にはマイクロスピーカの作製技術やオンチップマイクロスピーカ(アレイ) [1-5]を用いた音生成に関する多数の報告がある。スマートフォンやタブレット PC で使用される将来のマイクロスピーカのターゲットは、小面積、低フラット構造、軽量、低電圧駆動、高効率(低消費電力)、広く忠実な周波数応答範囲、十分な音響出力パワー、標準組み立て対応と低価格である。

MEMS ベースの微細加工薄膜タイプのアクチュエータは可聴周波数範囲の音を生成することができる。克服すべき課題の一つは、どうやって比較的低い駆動電圧で十分な出力音圧を達成するかである。一般に使用される静電気駆動[28]では、バイアス電圧が 40~70Vdc と非常に高い。ピエゾ電気[29,30]や従来のムービングコイルスピーカで使用された電気力学[31]を利用する他の駆動方法を用いることは良い解決策の一つではあるが、より複雑に(ピエゾ圧電材料や永久磁石の集積化)、より大きな電力消費と低い出力効率(電気力学利用)になる可能性がある。

薄膜スピーカアクチュエータのより基本的な問題は小さなデバイスで如何に大きな音圧を達成するかの方法である。スピーカは空気を振動させることにより音を発生する。大きな体積の空気を振動させるには大面積の薄膜と大きな振動量が必要である。特に低周波音のときには、放射インピーダンス(与えられた膜振動量に対して発生する音圧を決める)が減少するために問題となる。イヤホンでは外耳道の容量が小さく音響インピーダンスが大きくなるために大きな問題にはならないが、開放大気中の放射においては問題となる[28]。そのため、特に 600Hz 以下の低周波では周波数レスポンス仕様を緩めることによって、アナログの MEMS ベース音響スピーカが使用される可能性がある。

上記の放射インピーダンスの問題を解決するための有効な手段の一つは、従来のアナログスピーカではなくデジタルスピーカを使うようにすることである。デジタルと記されている現代のスピーカはほとんどの場合アナログ増幅器で駆動されているアナログスピーカである。デジタルと謳っているのはマーケティング戦略の一環であり、MP3 レコーディングなどのデジタルメディアとの親和性を主張しているに過ぎない。本当のデジタルスピーカは電子入力を音に直接変換することに依存しており、アナログスピーカとデジタル信号間の変換処理[32,33]を行う DA コンバータは必要がない。より具体的には、「デジタル音声再構成(DSR)」の概念は、何千もの個々の一致した 2 値スピーカ(薄膜タイプ)要素の集合作用によって可能になる。または代替アプローチとして、1 つのスピーカを使用してスピーカアクチュエータの一部を利用してビットを定義する。周波数レスポンスが主要特性の一つであるアナログスピーカとは異なり、デジタルスピーカでは個々のスピーカ要素の高速パルスレスポンスが重要である。

上記全てが、サイズ、重量、複雑さとコストに対する出力パワーと音質について最適化されたマイクロスピーカシステムを構築するために必要である。

## 6.5 ULTRASOUND DEVICES

超音波は一般的に 20kHz 以上の周波数の音波として定義されている。全ての音波と同じように、超音波は弾性固体、ガス状物質や液状物質の中を伝播する。例えば、超音波はシリコン中、空気中、水中をそれぞれ 40cm、2cm、8cm よりも短い波長で伝播する。それに比べて、電磁波は伝播のための媒質を必要とせず、真

空中での周波数 20KHz の場合の波長は 15km よりも短く、同じく周波数 30GHz の場合の波長は 1cm である。さらに、電磁波は水中やシリコン中はほとんど伝播しない。

超音波を利用したアプリケーションは数多く、アクチュエーションや浮揚、ドラッグデリバリーを介して位置/範囲測定から医療まで多岐にわたっている。これらの中で、通信、非破壊試験および画像イメージングは、社会に大変革をもたらす超音波装置として開発されている。

新しいマイクロマシンデバイスは現在のピエゾ圧電超音波振動子を置き換えるべく開発されている。マイクロマシン超音波振動子(MUT)は独立している薄膜と駆動/センシング部からなる。例えば cMUT は静電容量を、pMUT はピエゾ圧電体を有している。これらの中で、cMUT が最も広く研究開発されている(図 10 参照)。

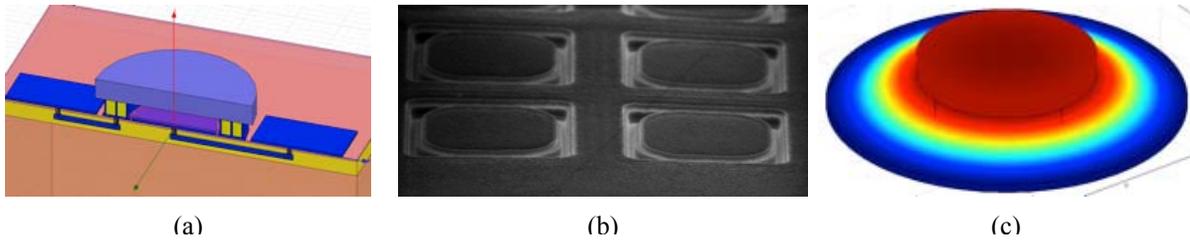


Figure MEMS10 (a) Schematic cross-section of a capacitive micromachined ultrasound transducer (cMUT), (b) SEM detail of four dual thickness cMUT cells from a 2D array of acoustic pixels, and (c) COMSOL simulation of the first eigenmode of a dual thickness cMUT cell.

MUT の開発は、特に医療用画像応用とビジネスのトレンドによって推進されている:

- 低価格超音波システム — MUT は高度に集積化され、CMOS ファウンドリで高精度で大量に生産されている。
- ポータブル超音波システム — MUT は低価格と集積化のしやすさでポータブル超音波イメージングシステムの市場拡大を加速する。それらは、患者を遠隔からモニタリングし、利用可能な健康アプリケーションの範囲を広げ、イメージングシステムが患者の臨床現場に届くことを可能にする。
- ウェアラブル超音波システム — 簡易化された MUT ベース超音波システムは、連続的に移動可能な心臓超音波診断用の医療用パッチに取り付け可能である。
- 高性能超音波システム — MUT は高集積化でき、電子機器と高密度にパッケージングできる。そのため寄生部が減って高い S/N 比が実現できる。MUT は多チャンネルの 4D(3D と時間)イメージングシステムのキーデバイスである。
- フレキシブル超音波システム — MUT の特長は広いバンド幅の超音波を発生でき、10MHz 以上の周波数範囲を簡単に達成できることである。これは高性能多目的超音波イメージングシステムを実現できる。
- 頑丈な超音波システム — アナログ IC と集積化されることによって、MUT はイメージングシステムのデジタル回路を超音波プローブヘッドに近づけることが可能である。そうすることにより、超音波プローブヘッドは簡素で頑丈になる。

MUT のための重要な技術課題は以下の通りである:

- 信頼性の向上
- 高密度 TSV および 3D 積層技術を含む集積化スキーム
- MUT ベースシステムの設計環境
- 低コスト化
- 特定の医療応用のための性能確認および証明

## 7 CONCLUSIONS

MEMS製造のバックエンド(パッケージとテスト工程)が、全製造コストの約2/3を占めているにもかかわらず、依然として、実質的には、全R&D投資の多くが製造のフロントエンド(デバイスとプロセス開発)に成されていることが、問題の原点としてあります。この報告書の中で述べられているロードマップへの取り組みは、産業界からのMEMS技術へのニーズと、将来に必要となる技術の間での会話を始めるという長い長い道のりへの最初の第一歩です。産業界が直面している課題への統一見解は、この技術ロードマップ策定作業における最初の成果であり、それは、適切なタイミングで、重要な製造ニーズに応えるために行うR&D投資を最適化する指針として用いる事が出来ます。このロードマップは、ディスクリートMEMSと集積化MEMS技術の両者の進化を考慮しています。ディスクリートMEMSの“ディスクリート”という言葉は、単一機能を実行するデバイスを指す言葉として用いられています。例えば、ASICが集積化された3軸加速度計は、この議論ではディスクリートMEMSと分類されます。一方、集積化MEMSは、複数のセンサー機能が集積化されたセンサーデバイスと分類されます。例えば、同一パッケージ内に実装された加速度計とジャイロスコプを持つデバイスです。ディスクリートMEMSデバイスは、連続的な性能の向上、そしてコストとパッケージサイズの削減が進むと予想されます。この分野での最大の課題は、パッケージに関するものです。具体的には、大幅なコスト削減を達成しつつ、パッケージサイズも小さくするというものです。ただ、2017年に至るパッケージサイズとコスト予想の両者を解決する新規技術は存在しません。MEMSテクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)は、MEMS技術における最大の課題は、集積化の方向性であると捉えています。慣性計測ユニット(IMU)においては、集積化の方向性は、3軸の加速度計と、3軸のジャイロスコプと、3軸の磁力計(コンパス)と、そして1つの圧力計(高度計)を集積したものとなります。これは、10自由度(DOF)を持つマルチモードセンサーと呼ばれます。テクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)は、特に加速度計とジャイロスコプに焦点をあてましたが、ロードマップの将来への拡張においては、磁力計と圧力センサーも含める必要があります。圧力センサーは、モバイルデバイスで使用される将来のIMUの中に盛り込まれるであろうMEMSデバイスです。磁力計は、定義からすれば、MEMSデバイスではありませんが、MtM(モア・ザン・ムーア)のパラダイムに含まれるデバイスです。マルチセンサ技術は、組み立て技術とパッケージ技術の課題、特に、パッケージレベルによるIMUセンサの集積化の課題に直面していますが、これらに対しては、暫定的で解決策ではありませんが、解決策が存在します。マルチセンサ技術に関する、解決策が見つかっていない、最大の懸念点は、テスト工程にあります。このレポートの中で議論されている可能な解決策は、テスト工程を、出来る限り製造プロセスの早い段階で実施していくことです。例えば、ウエハレベルでのテストのように。この手法は、ウエハレベルでのテスト結果より、正確にパッケージレベルでのテスト結果が予測出来る事が必要となります。他の解決策は、テストを容易にするMEMSデザインへのノウハウと、テスト自身を不要とするような、いわゆる“テストを必要としない設計”を開発する先進的な取り組みも含まれます。MEMSにおける不具合のメカニズムへの知見を継続して深めていく事が求められています。この事は、多くのアプリケーションへの採用が実現に至っていないRF-MEMSデバイスで特に重要です。不具合発生メカニズムへの知見を深めることは、デバイスの信頼性を向上させる術を可能とするかもしれませんし、信頼性に関する加速度試験を実現する術を見いださせてくれるかもしれません。特定のデバイスに関する知見は、それぞれの企業の中に蓄えられていることが認識されていますが、これらの知見は、商業的な利益と大きく関係する為、伝統的に秘密とされています。適切なタイミングで、情報を共有化する事は、全員の共通の利益となる事もあります。MEMSテクノロジー・ワーキング・グループ(TWG)は、このロードマップにおいて、MEMS技術に対する短期的な技術要求を検討しました。ロードマップに関する議論を、短期だけでなく、長期的な時間軸に対しても拡張したいとの要望はあるのですが、委員会は、まずは、MEMS技術に対してロードマップとはどういったものであるのか? という事へのコンセンサスを得る必要があると判断しました。MEMSへの長期的な技術要求とは、集積化の方向性に関する内容かもしれません。例えば、マルチセンサの集積化技術であったり、マイクロコントローラーへのASIC要求かもしれませんし、パッケージレベルでの集積化と3D積層による集積化とモノリシックな集積化の方向性に関する内容かもしれません。従って、短期的な技術要求は、長期的な集積化の1サイクルの中におけるデバイス性能の連続的な向上に関するものとなるかもしれません。長期に渡る集積化の方向性のロードマ

ップは、正確なコスト分析を要求し、加えて、将来のMEMSコンポーネントへの価格予測が、市場へ供給される際に必要となるリソースと技術と整合性が取れている必要があります。現在、ディスクリートMEMSにおいては、売価に対する原価(コスト)の割合を指標とする方法論が、近い将来における必要となる生産動向を予測する為の有効な手段として用いる事が出来ます。将来の集積化MEMSデバイスのコストを正確に見積もることは、非情に困難な課題と言われています。特に、基本的に異なるコンポーネントを集積化する際の技術課題を解決する為に要するコストの見積もり、そして、大規模生産における費用対効果の高いテスト装置開発のコストと、パッケージ・タスクのコストを見積もることは困難です。

## 8 REFERENCES

---

- [<sup>1</sup>] A.D. Wilson and M. Baietto, “Applications and advances in electronic-nose technologies,” *Sensors*, vol. 9, 2009, p. 5099–5148.