

2008 IEDM 調査報告

報告者： 五十嵐 泰史 [OKI セミコンダクタ株]

- 会議名： IEDM
- 開催期間： 2008年12月14日(Short course)
2008年12月15～17日(本セッション)
- 開催場所： Hilton San Francisco and Towers, California, U.S.

***** <要約> *****

IEDM(International Electron Devices Meeting)に参加し、More than Moore(MtM)関連技術の調査を行った。IEDMは半導体デバイス関連の主要学会である。今回は、Hilton San Francisco and Towersを会場にして、2008年12月14日にチュートリアル形式のショートコース、15～17日に本セッションが開催された。投稿論文数は596件であり206件が採択された。採択率は例年並みの35%である。最近の論文の傾向としては、MOSFETやメモリーデバイスを含むMore Moore関連の論文が多少減り、その分MtM関連の論文が増えている。また、MtM関連は企業以外の報告が多いため、全体として大学やコンソーシアムの貢献が目立ってきている。

MtMの報告は、MEMS関連、3D・実装関連、バイオ関連に大別できる。

MEMS関連は、すでに構造など基礎研究が終了しているMEMS振動子などでは、制御回路を含めたシステムとしての性能をアピールする報告などがあり、アプリケーションを選んで実用検討の段階に入っているといえる。ただ、MEMS振動子などは全ての課題を解決しているわけではなく、更なる研究開発が望まれる分野でもある。また、シート状デバイスなど、これまでの発想とは異なるプロセスで作製する新規デバイスも、今後の展開が興味深い。

3D・実装関連は、IMECと東北大学から実用検討の報告があった。フロントエンドとは異なり、コストが重視されやすいので、TSVなどの新しい技術がどのように実用化されていくのか着目していきたい。

バイオ関連は、プレナリーセッションの3件中1件にも組み入れていること、招待講演だけで構成したセッションを設けていることなど、IEDMとしても力を入れていく意図が見える。この分野が発展しブレイン・マシン・インターフェイスが実用化されれば、医療だけでなく幅広く産業界に応用されると考えられる。我々、分科会#1としても着目している分野であり、今後の展開に目が離せない。

新技術探索会議分科会#1 では、MEMS-IC 融合技術の検討を行っている。今回、海外技術調査のために、2008 IEDM(International Electron Devices Meeting)に参加し、関連技術の調査を行ったので報告する。

■ IEDM について

IEDM は 1955 年から開催されている半導体デバイス関連の学会である(今年は 54 年目)。Ge 点接触バイポーラトランジスタの発明が 1947 年なので、まさに半導体技術の発展と共にあったといえる。名実共に半導体デバイス関連では最も権威ある学会のひとつである。

過去 10 年間の平均投稿件数は 650 件であり、そのうち平均 35% 程度の論文が採択されている。発表によれば、2008 年は 596 件の投稿があり 206 件が採択された(採択率 34.6%)。

■ 全体の傾向

最近の傾向として、More than Moore(MtM)関連の論文が増えている。MtM と More Moore(MM)の明確な区分けは難しいが、セッションごとに分類を試みた(Invited paper も含めた)。

MM (Fin-FET, SRAM, high-k, ...)	14 セッション	(89 件、40%)
(DRAM, FLASH, その他 Memory)	4 セッション	(26 件、12%)
MtM (化合物半導体, スピン, MEMS, Bio, ...)	12 セッション	(76 件、34%)
その他 (パワーデバイス, モデリングなど)	4 セッション	(30 件、14%)

数年前までは Si-MOSFET とメモリに関する報告(MM 関連)が 70% 程度を占めていたが、今年 MM 関連が 50% 程度になり、その分 MtM 関連が増えていることがわかる。また、MtM 関連の発表者が所属する組織は、大学が 70% 近く占めているため、全体的に大学の貢献が増えている。

第 1 著者の国別に論文数を整理する。米国 76 件と日本 51 件が抜き出ている、3 位以下はベルギー、韓国、フランスがそれぞれ 12 件、イタリアと中国が 10 件ずつ、ドイツと台湾が 9 件ずつ、と続く。数年前までは、韓国から 20 件以上の論文がでていたが、最近半減している。

米国は、76 件中 37 件が MtM 分野であり、米国の論文の半数がこの分野に属している。米国の MtM 論文の増加によって、MtM 分野の論文数の半数が米国からの発表になっている。米国の MtM 分野の第 1 著者の組織はその 8 割以上が大学である。一方、日本は 51 件中 10 件(約 2 割)が MtM 分野であり、そのうち 6 件が大学からの発表である。米国の内訳を考慮すると、日本はこの分野でさらに貢献できる可能性がある。

次に、第 1 著者の組織別に論文数を整理する。東芝 13 件、IMEC と Stanford Univ. が 11 件、IBM 10 件、Samsung 9 件、東大 8 件、Intel と Purdue Univ. が 7 件、CEA-LETI と MIT が 6 件と続く。数年前までは、Samsung、IBM、東芝が 1~3 位を形成していたが、IBM と Samsung はそれぞれ 4 位と 5 位になった。2 位に入ったのは、大学とコンソーシアムであり、MtM 関連論文の増加と関係すると考えられる。

■ MtM 関連発表の分野

IEDM で報告された MtM 関連論文は、下記のように分類できる。

- ・ MEMS 技術 (振動子、マイクロミラーデバイスなど)
- ・ 3D・実装関連技術 (封止技術、実装技術など)
- ・ バイオ関連技術 (インプラント、脳細胞と FET のマッチングなど)

- ・その他（シート状デバイスなど）

以下に、それぞれの分野の内容をまとめる。

■ MEMS 技術

振動子やマイクロミラーの報告は、Session 28 で 7 件あった。この分野は、MEMS 構造(形状)自体はあまり新規性はないが、従来からの課題をアプリケーションのシステム全体で解決する工夫を施した発表が目立った。

(1) 振動子

MEMS 振動子は、水晶発振子より小型であり、Si LSI にモノリシックで形成することが可能なため注目されている。MEMS 振動子の課題を整理しておく。MEMS 振動子は水晶振動子と比較されることから、①等価抵抗(motional resistance)が大きい、②温度係数が大きい、③周波数の合わせこみがしにくい、④バイアス電圧依存性が大きいと周波数安定性を確保しにくい、などがある。IEDM でもこれらの課題解決の報告がなされていたが、全てを解決する提案は無かった。

スイス連邦工科大学ローザンヌ校(28.3)は、等価抵抗を低減できる構造を報告した。振動を容量検出すると等価抵抗が高くなるため、振動の検出方法に工夫がある。固定電極をゲートにし、振動梁を FET のチャンネルとして機能させ、振動を FET のコンダクタンス変化として検出する。この結果、16k Ω の等価抵抗が 31 Ω に低減できた。このデバイスは、ゲインを持った MEMS 振動子ともみなせるので、RF フロントエンドのミキサーや発振器に利用しやすい。発想自体は 40 年以上前に提案されたものであるが、SOI ウェハとの相性は良さそうである。ソース・ドレインなどの不純物拡散層の形成が大変そうだが、アプリケーションによっては使われていくかもしれない。

NXP-TSMC(28.4)は、Si 単結晶で形成した MEMS 梁のピエゾ抵抗の変化で振動を検出する。この方法も等価抵抗の低減に効果がある。ピエゾ抵抗には n 型 Si を使用し、ピエゾ抵抗係数が<100>方向で最大になることを利用している。また、MEMS の固定部によるロス(アンカーロス)を低減したり各寸法を最適化することで振動の Q 値を高め、電圧利得を 1 以上にできることを示したことが興味深い。

スタンフォード大学[米](28.5)は、MEMS 振動子で OCXO(Oven Controlled X'tal Oscillator)を代替できることを示した。OCXO は、 ± 1 ppm 以内の周波数安定性を得るために小型恒温槽を備えた水晶発振器である。従って、大きさは 2.5 \times 2.5 \times 1cm 程度と大きく、消費電力も 1W 程度ある。これを MEMS 振動子で置き換えることで、数 mm 角で消費電力が 70mW 程度になることを示した。この発表は、MEMS 振動子だけでなく制御回路も合わせ込んで全体を最適化している。MEMS デバイスは、やはりアプリケーションを限定して、システムとして開発していくことが必要なのだろう。

ジョージア工科大学(28.6)は、145MHz の振動子で低等価抵抗を実現した。SOI ウェハの Si 層の厚さを調整し、振動モードを変えることなく最も等価抵抗が下がる 15 μ m を採用した。この結果 Q 値も改善され、145MHz で Q=51000、等価抵抗=2.4k Ω が得られた。この素子を使って発振器を作り、GSM の規格をクリアする位相雑音(-111dBc/Hz @1kHz offset) が実現できた。この発表も GSM 用発振器に特化して性能を追及したものといえる。

(2) マイクロミラーアレイ

IMEC(28.1)は、マスクレスリソグラフィ用マイクロミラーアレイを開発した。MEMS 構造材料に SiGe を使用することで、400 $^{\circ}$ C 以下のプロセスが可能になるため、0.18

μm アナログ CMOS の上にミラーアレイを形成できた。 $8\mu\text{m}$ □/pixel で 11M pixel のアレイを実現した。動作の信頼性も 2.5×10^{12} 回以上の繰り返し再現性を確認している。チップサイズが $4.6\text{cm} \times 2.2\text{cm}$ と大きいこと、高価な SiGe 材料を使用していること、CMP による平坦化を多用していることなど高コストと思われるが、用途を露光装置に限定しているので許容範囲なのであろう。

(3) 超音波振動子

農工大(28.2)は、ナノ結晶 Si を使用した超音波振動子を開発した。ナノ結晶 Si は熱容量と熱伝導率が共に小さく、電気エネルギーを音波に変換する材料としては理想的とのことである。Si 基板の陽極酸化でナノ結晶 Si を形成して、 5mm □の振動子の特性を報告した。得られたデバイスは、パルス応答に優れており、デジタル制御で高効率な超音波振動子が実現できたとする。また、デジタル制御で 10Hz ~ 80kHz の広帯域を再生できることも示し、音楽再生用のスーパーツイーターにも応用可能であることを述べた。会場で実際に音楽を鳴らしてアピールしていた。

■ 3D・実装技術

3D・実装技術の報告は、招待講演として IMEC と東北大から報告された。

IMEC の報告(20.4)は、IMEC で開発した封止技術と TSV(Through Silicon Via)の形成技術についてレビューした。MEMS デバイスでは、ダイシングする前に素子部分を覆っておく必要があるためウエハレベルの封止技術が必要である。デバイスウエハと封止ウエハを接合する方法として、有機膜(BCB など)による方法、共晶反応(Cu/Su など)を利用する方法、金属の直接接合(Au/Au や Cu/Cu)を利用する方法などがある。有機膜はリークが起こりやすいため密封するには、接合面積を充分にとる必要がある。共晶反応は温度制御を精度良く行う必要がある。直接接合は、清浄表面を出すことと接合面の高さを揃えることが必要であり、IMEC では接合面をカッターで削ることでこれらを達成できたとする。TSV は、寄生容量の低減とホール周りの応力緩和のために、ホールのライナーとして有機膜を入れた構造を提案している。IMEC の TSV は、明らかにマイクロプロセッサなどの付加価値が高いハイパフォーマンス・デバイスへの適用を目指した技術で、CMOS イメージセンサなどの低コスト用途ではない。このような TSV を使用できる企業もかなり限定されると思われる。性能とコストをどのように折り合いをつけながら市場に導入されるのか興味深い。

東北大学(20.5)は、KGD(Known Good Dies)を実装する方法として、パターンニングされた親水性処理表面をもつ、チップと基板を使った自己整合アッセンブリー技術と、それらのチップをマルチチップモジュールとして機能させるためのチップ間配線技術について報告した。基板のチップ配置位置に親水性のパターンニングを施すことで、同じく親水性処理をしてある KGD を $\pm 1\mu\text{m}$ 程度の精度で高スループットでアライメントできることを示した。

■ バイオ関連

バイオ関連は、招待講演だけで構成したセッションを設けるなど IEDM が今後取り込もうとしている分野である。

プレナリーセッションで報告された Max Planck Institute の技術(1.1)は、脳細胞と MOSFET を組み合わせたデバイスに関するものであった。ソース・ドレインを形成したウエハ上に脳細胞を電解液と共に載せた構造である。脳細胞を刺激すると Na^+ や K^+ イオンが出入りするため細胞近傍に電位変化が生じる。これを MOSFET のゲート電位変化として検出する実験の結果を示した。現在は原理検証的なレベルではあるが、脳科学の発展と共にこのような技術が応用され役立てられていくのであろう。

インプラントブルデバイスの報告は、南カリフォルニア大学(13.1)、IMEC(13.2)、ブラ

ウン大学(13.3)からあった。

南カリフォルニア大学は、人工網膜システムについてシミュレーションとデバイスの検討結果を示した。人の顔を認識するレベルを達成するには600ピクセル以上が必要とした。これを実現するシステムは、小型カメラの映像をウェアラブルコンピュータで処理し、眼球内のデバイスに転送し視神経に繋げる方式を提案した。眼球内のアンテナの性能が重要になるため検討を進めている。

IMECは、インプラントデバイスの実装や配線などの検討と、脳細胞などと直接信号をやり取りするためのプローブ針の基礎検討結果を報告した。

ブラウン大学は、脳に電極を入れて直接脳波を取り出す試みについて、動物実験(サル)の結果までを報告した。脳に入れたシステムは、外部からの電磁波で電源と信号を受けて動作し、頭皮の下に置いた面発光レーザーを光らせて、検出した脳波を光(波長850nm)で外部に出力する。システムは、頭蓋骨の内側(脳に電極を接触させる部分)と頭蓋骨の外側(頭皮を介して電源と信号をやり取りする部分)からなる。脳に近い部分は、温度上昇を0.1°C以下に抑える必要があるため、低消費電力が求められる。

いずれも原理検証ではあるが、海外ではインプラントデバイスについて精力的に検討されている。日本は、基盤技術は有しているがこの分野の研究開発は進めにくい。日本でバイオ関連で貢献できるのはインプラントデバイス以外の分野だろう。今回、早稲田大学から、DNAのハイブリダイゼーションを検出するデバイスの報告があった(20.1)。ダイヤモンドFETを利用したデバイスで、DNAを含む電解液に曝されたチャンネルを持つ。DNAがハイブリダイゼーションする際に負に帯電するので、チャンネルにホールが誘起されて、ソース・ドレインのコンダクタンスが変化する。このデバイスは、ハイブリダイゼーションの際に塩基配列のミスマッチが1箇所生じた際の電位変化をも検出できることを示した。今後の進展が期待できる成果である。

■ その他

東大からシート状デバイスの報告があった(4.7)。このデバイスは、超音波の発振及び検出が可能であり、10cm~1m程度の距離にある物体を検知できる。将来は、ロボットの皮膚に組み込んで、ロボットの安全性を高める用途などを想定している。デバイスの構成は、超音波振動子と有機薄膜FETからなるセルをシート上にアレイ化している。印刷技術を多用して製造されており、超音波振動子はPVDF(piezoelectric polyvinylidene fluoride)からなり、有機薄膜FETはペンタセンを用いている。振動子を40kHzで発振し、物体から反射された音波を別のセルで検出して、動作を確認した。会場から、分解能を上げる方法について質問があったが、振動子の周波数を単純に上げる方法では、シート内でクロストークなどで動作に問題が出て来やすいので工夫が必要とのことであった。

■ まとめ

IEDMの最近の傾向として、More Moore(MM)に関する発表が減り、その分More than Moore(MtM)に関する発表が増えている。MtMの発表者は大学が70%を占めるため、以前に比べて大学の貢献が目立つようになった。MtM分野で件数が多いのは米国で、約半数を占めている。日本は、MtM分野では第2位の論文件数で13%程度を占めているが、今後はこの分野でさらに件数を伸ばせると考えられる。

MEMS技術は、振動子などMEMSの構造が出尽くしたデバイスについては、アプリケーションを限定してシステム全体の最適化を図った報告が多い。これは、現状の技術でMEMS振動子などに特有の欠点を全て解決できている訳ではないため、必要な性能を制限して実用化を進めた結果と考えられる。このあたりにもMtM特有のアプリケーションに特化した研究開発が感じられる。一方で、多種多様なMEMSプロセスの統一が望まれており、

今後の MEMS 技術開発の難しさが垣間見える。

バイオ関連技術は、インプラントブルデバイスの研究が海外で精力的に進められていることを再認識した。特に米国は脳や神経へのデバイスの接続を目指した研究が活発なようである。このような研究は、最終的にはブレイン・マシン・インターフェイスに繋がるものであるが、現状では基本検討の段階である。この分野は、直接脳にデバイスを埋め込む以外の方法も併せて、今後も活発な検討が進められると考えられる。

日本の技術力は MtM 分野でもアピールしており、ダイヤモンド FET を利用した DNA センサや、シート状デバイスなど特徴のある報告が存在感を示している。

IEDM は数年前までは MM 関連が主軸の学会であったが、最近は MtM 関連も積極的に取り込んでいる。MtM の主な流れを把握するには適した学会であり、今後も調査を続けるべき学会と言える。2009 年の IEDM は、12 月 7～9 日に Washington DC の Hilton Washington and Towers にて開催される予定である。

以上