

■S2 群 (ナノ・量子・バイオ) -2 編 (ナノエレクトロニクス)**8 章 ナノエレクトロニクスの新展開**

(執筆者：田原修一) [2010年2月 受領]

シリコンデバイスの微細化による集積化の進展は、LSI の高度化をもたらし、現在の豊かな情報社会を作り出した。これに呼応するかたちでナノスケールの構造制御技術が進み、光や振動の特異な性質を用いた新機能デバイスや、電子と光、スピン、流体、機械振動など異なる物理量との融合の機会が生まれた。本章ではこのような新たなエレクトロニクス領域を切り開かんとしている技術を取り上げた。

テラヘルツ領域は情報通信技術にとって未開の領域として知られている。その開拓にはテラヘルツを扱う手法やデバイスのブレイクスルーが必要である。画期的なテラヘルツ光源として実現された量子カスケードレーザはまさにナノテクノロジーを屈指したものである。検出器にもイノベーションが進んでおり、テラヘルツ領域の利用技術の開拓が期待されている。

電子の移動に基づくシリコン LSI と異なる物理現象との融合(ヘテロインテグレーション)は、シリコン LSI をいわばプラットフォームとして利用し、機能や性能の飛躍を目指す試みである。LSI と光の融合を目指したシリコンフォトリソグラフィは、シリコンチップ上で光が伝播する導波路技術と光電気信号変換技術を実現し、シリコン LSI のボトルネックである配線遅延の問題を解決する技術として期待されている。このような光と電子の融合技術は、ミクロスコピックな量子力学的相互作用の積極的な利用により、今後、量子情報のような新たな情報処理の実用化に寄与するだろう。スピンも古くから知られている量子の一つである。GMR、TMR などの発見にも刺激され、近年この新たな自由度の利用への関心が高まってきた。最初に開花するのはスピンの示すマクロな物性である磁性の利用であろう。例えば、強磁性体の示す物性は、情報論的には不揮発的な情報記憶という特長として捉えることができる。この観点で磁性トンネル素子とシリコン LSI との新たな融合が試みられている。情報の不揮発性により、パワー供給を停止しても情報が残るため、情報維持のための電力消費の低減、再構成可能回路の小型化が可能である。更に、適切な回路アーキテクチャを用いれば更に性能向上を実現するだろう。

ヘテロインテグレーションは、シリコン LSI を単なる情報処理チップから別の軸を与えるものとしても期待される。バイオセンサ、センサ処理回路を融合し、DNA 反応をセンシングするチップは、DNA 解析に代表される医療・健康領域への大きな貢献が期待される。電気泳動など流体現象までをチップレベルの空間に生成し処理するラボオンチップは、化学実験の姿を抜本的に変え応用領域を大きく開拓するだろう。MEMS は当初ミクロスケールの機械振動系として開発され、力学的な物理量のセンシングデバイスなどに実用化された。今や MEMS もまたシリコン LSI とインテグレーションすることにより、センシングと処理の一体化を実現し、高機能なセンシングデバイスや多機能チップの実現を目指している。また、環境に溶け込むエレクトロニクスを目指し、機械振動をエネルギー源とし、電源を必要としない回路の研究も盛んになっている。

以上のように、ナノエレクトロニクスは、情報処理技術のいわば仮想的な世界だけでなく、仮想的な世界と実世界をつなぐ“接点”として将来に向け大きな役割を果たすだろう。今後のブレイクスルーに期待したい。

■S2 群-2 編-8 章

8-1 テラヘルツ光源／応用

(執筆者：斗内政吉) [2009年8月 受領]

テラヘルツ (THz) 帯は、エレクトロニクスとフォトニクスを繋ぐ領域、周波数でいうと 100 GHz～30 THz 近傍の光・電磁波・電気信号が主役となる領域である。この領域は、長年、未開拓領域として、基礎研究や特殊な分析応用が進められてきた。1990年代に入って、新しい分析技術であるテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) が利用され始め、1995年頃にそのイメージング応用への可能性が紹介されたのを切っ掛けに、新しい研究分野としての幕開けを迎えた。その後、約 10 年間で様々なブレイクスルーがもたらされ、2005年頃から、応用への期待が高まり、重要分野として認識され始めた。

テラヘルツ科学技術は、様々な学問と技術の融合領域で、バイオ・医療・健康・工業・宇宙・環境・安全／安心・情報通信・基礎科学など広範な応用が期待されている^{1), 2)}。この分野を支える基盤には、テラヘルツ光源・検出・イメージング技術ならびにそれらを実現するための基礎科学などがある。ここでは、それらのうち、ナノエレクトロニクスが活躍する基盤技術を簡単にまとめる。

THz 発生には、光 THz 波変換、ミリ波通倍器、電子デバイス発信器など様々なものがあるが、そのなかで注目を集めているものに、THz 量子カスケードレーザ (THz-QCL) がある。THz-QCL は超格子のサブバンド間遷移を利用するもので、複雑な超格子設計をすることで、緩和エネルギーが THz 帯になることを実現したもので、2002年に初めて発振した。そのバンド構造を図 8・1(a) に示す。一つのブロックが、電子注入層と THz 波発生層で構成され、一つのブロックで発生した THz 波が、次のブロックでの誘導放射を実現するもので、電子は、サブバンドの走行が維持されるので、次のブロックでも再利用される。レーザ発振に必要な反転分布の実現は、フォノン散乱を利用したものなど、様々な機構が提案されている²⁾。その発振例を図 8・1(b) に示す。

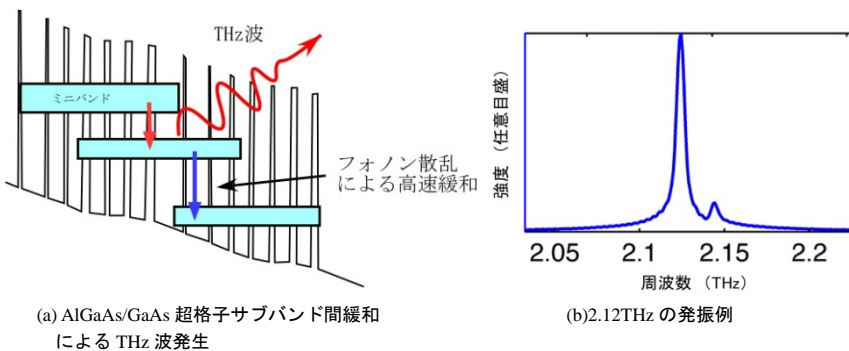


図 8・1

研究開発の方向性としては、高温動作、低周波数発振、CW 動作、高出力化、低閾値電流動作などがあげられる。現在までに最も低い周波数としては、磁場下で、0.68 THz が報告されている。動作温度としては、パルス動作で 186 K、磁場下で 225 K、CW 発振では 117 K が

実現されている。出力も、4.4 THz で 250 mW (パルス)、出力が可能であり、140 mW (CW) が実現されている。また、開発された THz-QCL を用いたリアルタイムイメージングシステムの開発なども取り組まれている³⁾。

もう一つの注目すべき THz 光源電子デバイスとして、共鳴トンネルダイオード (RTD) がある¹⁾。電子が二準位間をトンネルする際の負性微分抵抗を利用して発振するもので、基本波で 830 GHz⁴⁾、高調波で 1.02 THz の発振を実現している。出力は数 μW 程度と小さいが、アレイ化などによる改善が進められている。更に、GaInAs/AlGaAs/GaAs 構造における 2 次元プラズモン素子からは、6 THz に及ぶ広帯域テラヘルツ波発生も報告されている⁵⁾。その他、固体デバイスでは、古典的なガン・インパットダイオードなどの高周波発振も開発されている。

固体素子を用いたフォトミキシングによる THz 発生デバイスとして最もポテンシャルが高いものに、単一電荷走行ダイオード (UTC-PD) がある¹⁾。このデバイスは、光励起により発生する電子と正孔キャリアのうち、高移動の電子のみを利用するもので、テラヘルツ通信用光源には不可欠なデバイスとして位置づけられている。

THz-TDS に広く利用される THz 検出器として、低温成長 (LT-) GaAs 光伝導アンテナがある。LT-GaAs は 200~300°C の低温で、GaAs を MBE 成長し、600°C 程度で短時間アニールしたものである。成長時にはヒ素を数%過剰に含ませ、その後のアニールにより、数 nm 径のヒ素のプレシピテートが数百 nm 間隔で分散している。THz 波の検出は、光励起した電子が、その電界により、比較的高移動度で加速さ、光電流を生成するとともに、ヒ素欠陥による短時間のトラップで、高速応答 (広帯域時間領域検出) を実現したもので、ナノエレクトロニクスデバイスと言える。

THz イメージング用ナノデバイスとして、二次元電子ガス検出器と小型アンテナ及びアパーチャを組み合わせたものが開発されている⁶⁾ (図 8・2)。エバネッセント波を利用することで、THz 波の波長より小さな分解能、約 9 μm を実現している。

また、カーボンナノチューブやグラフェンの、THz 光源や検出器への応用が精力的に件有されている。高度に配列したカーボンナノチューブは、THz 波の偏光子として優れた特性を示すことが報告されており、THz 波制御技術への応用が期待されている⁶⁾。

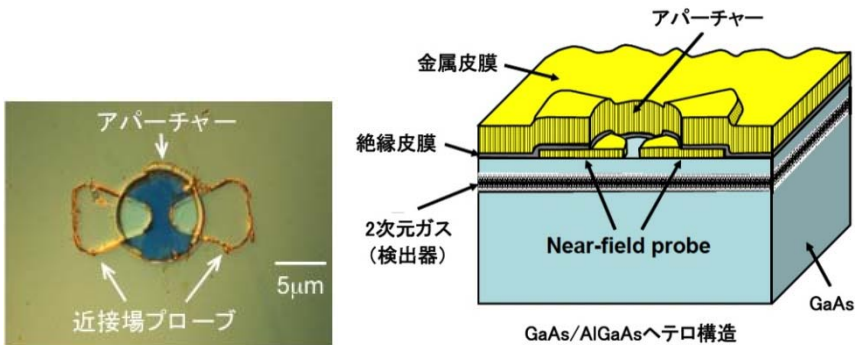


図 8・2 近接場アンテナ結合型 THz イメージングチップ⁶⁾

■参考文献

- 1) 斗内政吉, “テラヘルツ技術,” オーム社, May 2006.
- 2) M. Tonouchi, *Nature Photonics*, vol.1, pp.97-105, 2007.
- 3) A. W. Lee et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.18, 1415, 2006.
- 4) S. Suzuki, et al., *Applied Physics Express*, vol.2, 054501, 2009.
- 5) Y. M. Meziani, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 201108, 2008.
- 6) Y. Kawano, et al., *Nature Photonics*, vol.2, pp.618-621, 2008.
- 7) L. Ren, et al., *Nano Letters*, vol.9, 2610, 2009.

■S2 群-2 編-8 章

8-2 ヘテロインテグレーション

8-2-1 LSI と光配線の融合

(執筆者：大橋啓之) [2009年12月 受領]

微細化技術の進歩はエレクトロニクス発展の原動力であったが、配線に関しては電気抵抗、電気容量とも微細化により低減されないため、配線が遅延及び消費電力の主要因になってきた。光配線は遅延も伝播損失も少ないが、電気・光信号変換が必要なため伝送距離が短いと変換に伴うオーバーヘッドが無視できなくなる。この信号変換に伴う消費電力及びコストが十分小さければ、LSI からボードまでの広い範囲を同じ光伝送方式で繋ぐことができる¹⁾。Si-LSI の製造プロセスで光素子を製造するシリコンフォトニクスは、大規模市場に対して低コストの光配線を提供し得る。また、光配線導波路のコアに Si、SiN などの高屈折率材料、クラッドに SiO₂ を用いてコアへの光閉じ込めを強くすることで、光配線を小さな半径で急峻に曲げることも可能になる。光配線は波長多重導入で配線当たりの伝送容量が飛躍的に上昇するが、シリコンフォトニクスによるアレイ導波路回折格子やリング共振器などの波長合成分波器は数 μm から 100 μm 程度のサイズになる^{2),3)}。

LSI 上における急激な温度変化の影響を避けるため、光源は電源同様外部に置いて光ファイバにより導波路までもってくる方式が現実的だと考えられる⁴⁾。この場合、光源には III-V 化合物の半導体レーザを用いることができるが、Si などの IV 族による集積光源を目指した開発も行われている⁵⁾。ファイバと導波路のサイズ差を埋めるために、テーパ状の導波路を用いたスポットサイズ変換器、グレーティングやエバネッセント波を用いたファイバ導波路結合器などが開発されている^{2),3)}。また、波長多重導入に当たっては温度変化による共振周波数の変化を防ぐため温度無依存化技術が重要となる⁶⁾。

電気信号を光信号に変換する電気光学変調器の材料として、電気光学セラミックスや電気光学ポリマーなどの非 Si 系材料を用いる方法がある¹⁾。一方、Si は結晶の対称性のために 1 次の電気光学効果は現われず、弱い 2 次の電気光学効果しか得られない。絶縁破壊強度を上回る電界 10⁶ V/cm を印加しても屈折率変化率は 10⁻⁴ 程度しか得られない⁷⁾。Ge 量子井戸や歪み Si を用いた電界吸収型変調器（電界によりエネルギーバンドを傾けて光吸収を起こす）は 10 μm 程度の小型化が可能である⁸⁾。

シリコンフォトニクスにおいて盛んに開発されているのがキャリア濃度により Si 導波路の屈折率を変化させるタイプで、電流注入した自由キャリアのプラズマ効果を利用するものと、MOS キャパシタ界面付近のキャリア濃度を変えるものがある。前者は再結合に基づく遅い緩和時間成分のため高速化に限界があるが、電気信号に対しプリエンフェシスをかけてキャリアの注入及び引き抜きを短時間で行うことで高速化が可能になる⁹⁾。後者は電極界面付近でのキャリアの空乏化を利用する。キャリア注入型に比べて高速化に適している¹⁰⁾。電界吸収型以外でサイズを数 10 μm 台にするには、リング導波路など共振構造をもたせることが有効であるが、波長多重技術と同じく温度無依存化が必要となる。

光信号を電気信号に変換する受光器には Si 及び Ge のフォトダイオードが検討されている。Si は波長帯が 1 μm 以下に限定され、かつ吸収長が比較的長い（波長 800 nm で約 10 μm ）ためデバイスサイズが大きくなり応答速度が遅くなる欠点があるが、表面プラズモンアンテナ

などの共鳴機構と組み合わせることで小型化し高速応答が可能になる^{13,14)}。Si ウェハに形成された Ge フォトダイオードは、Ge の貫通転位に基づく暗電流（光がないときにも流れるノイズ電流）を減らすために高温（800～900℃）でのアニールが必要とされていたが、SiO₂ 上への Ge の直接成膜方法の開発、Ge 上への Si キャップ設置などプロセス低温化の試みが行われている⁴⁾。

■参考文献

- 1) K. Ohashi, K. Nishi, T. Shimizu, M. Nakada, J. Fujikata, J. Ushida, S. Torii, K. Nose, M. Mizuno, H. Yukawa, M. Kinoshita, N. Suzuki, A. Gomyo, T. Ishi, D. Okamoto, K. Furue, T. Ueno, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, S. Itabashi, and J. Akedo, "On-chip optical interconnect," Proc. IEEE, vol.97, no.7, pp.1186-1198, Jul. 2009.
- 2) G. T. Reed and A. P. Knights, "Silicon Photonics, an introduction," John Wiley & Sons, Chichester, 2004.
- 3) L. Pavesi and D.J. Lockwood, "Silicon Photonics," Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
- 4) 和田一実, "シリコンフォトニクス," 電子情報通信学会誌, vol.91, no.3, pp.194-200, Mar. 2008.
- 5) 金光義彦, 深津 晋, "シリコンフォトニクス," オーム社, 2007.
- 6) L. Zhou, K. Kashiwagi, K. Okamoto, R. P. Scott, N. K. Fontaine, D. Ding, V. Akella, and S. J. B. Yoo, "Towards athermal optically-interconnected computing system using slotted silicon microcoring resonators and EF-photonic comb generation," Appl. Phys. A., vol.95, no.4, pp.1101-1109, Feb. 2009.
- 7) R. A. Soref and B. R. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," IEEE J. Quant. Electron., vol.23, no.1, pp.123-129, Jan. 1987.
- 8) D. A. B. Miller, "Device requirements for optical interconnects to silicon chips," Proc. IEEE, vol.97, no.7, pp.1166-1185, Jul. 2009.
- 9) W. M. Green, M. R. Rooks, L. Sekaric, and Y. A. Vlasov, "Ultra compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator," Optics Express, vol.15, no.25, pp.17106-17113, Dec. 2007.
- 10) M. Lipson, "Guiding, modulating, and emitting light on silicon-challenges and opportunities," J. Lightwave Technol., vol.23, no.12, pp.4222-4238, Dec. 2005.
- 11) 大橋啓之, 藤方潤一, "シリコンベース光検出器," 光学, vol.37, no.1, pp.21-26, Jan. 2008.

8-2-2 LSI と磁性体との融合

(執筆者：羽生貴弘) [2010年1月 受領]

現在の超微細シリコン集積回路 LSI では、トランジスタなどの能動素子自体が有するスイッチング遅延に比べ、素子間の配線遅延及びそれに起因するメモリと演算器間のデータ転送ボトルネックが、LSI チップの性能を支配する大きな要因となっている。更に、LSI チップの微細化の進展に伴い、電力消費の著しい増加を招く。例えば、スタティック RAM などのオンチップメモリは揮発性であるため、データ保持のために電源電圧を常時通電しておかなければならず、リーク電流に起因する待機電力を消費してしまう (図 8・3 参照)。

このような現在のシリコン LSI 問題を本質的に解決する一つの方法として、磁性体との融合がある。磁性体は電源電圧を供給せずに (記憶) 状態を保持し続け

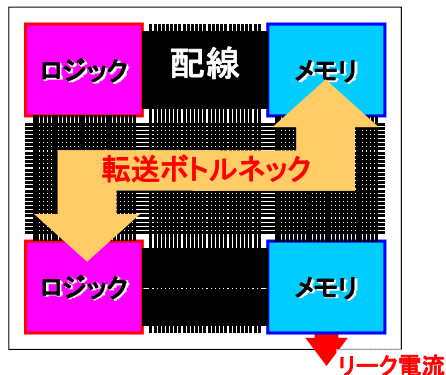


図 8・3 LSI チップの構成例

られる，不揮発性材料である．磁性体材料を用いたデバイス構成例として，**図 8・4**(a)に磁気トンネル接合 (Magnetic Tunnel Junction : MTJ) 素子の構造を示す．MTJ 素子は自由層 (Free Layer) にあるスピンの向き固定層 (Fixed Layer) スピンと平行もしくは反平行に設定することで，素子の抵抗値が変化する可変抵抗素子として，**図 8・4**(b)のようにモデル化できる．

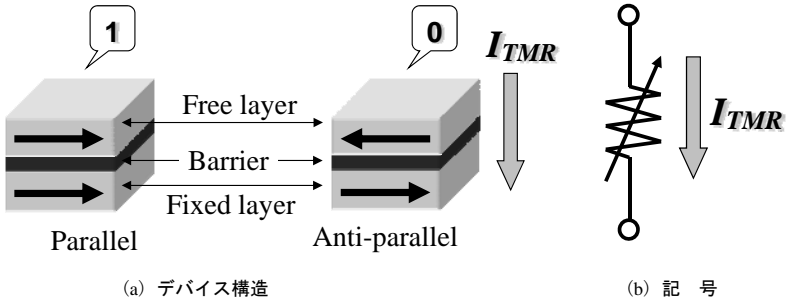


図 8・4 MTJ 素子

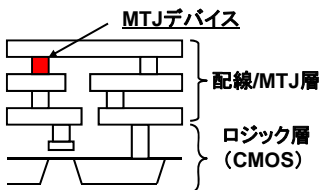


図 8・5 MOS/MTJ ハイブリッド集積回路の断面図

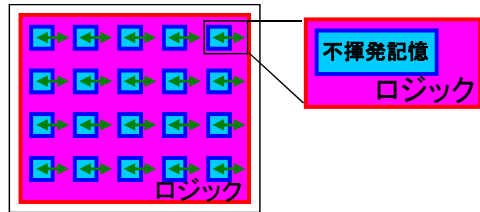


図 8・6 ロジックインメモリアーキテクチャ

MTJ 素子は，不揮発性という性質のみならず，高い書込み耐性，読出し動作の高速性，微細化容易性，CMOS 集積回路とのプロセス親和性 (配線層に積層して実現できるため，CMOS プロセスは従来そのまま変更なし (**図 8・5**))，などの性質を有する．そのため，**図 8・6**に示すようなロジックインメモリ (記憶機能がロジック部に分散配置された) アーキテクチャを容易に実現できることとなる．すなわち，半導体メモリを MTJ 素子に置き換え，LSI と磁性体とを融合することで，①記憶機能を不揮発化する効果による待機電力の完全削除，②CMOS 層の上部にスタックして実現する効果によるチップ面積の削減，ならびに，③トランジスタ回路網に MTJ 素子を内蔵させ，記憶機能と演算機能を一体化する効果による回路規模のコンパクト化，動的消費電力の低減，配線遅延を大幅低減，などの性能向上が見込めることとなる (**図 8・7** 参照)．

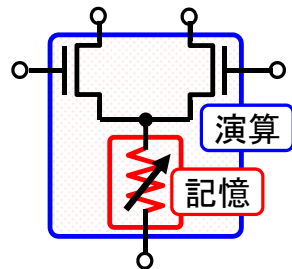


図 8・7 MOS/MTJ ハイブリッド回路の構成例

8-2-3 LSI とバイオの融合

(執筆者：川浦久雄) [2009年1月 受領]

近年のゲノム科学の進展に伴い、テーラーメイド医療や感染症検査へ DNA (Deoxyribonucleic Acid) の配列情報を利用しようという試みに大きな期待が集まっている。配列情報の取得には DNA アレイチップが広く用いられるが、これは互いに配列の異なる複数の DNA (プローブ DNA) がガラス基板上に固定されたものである。試料中のターゲット DNA を蛍光分子で標識しチップ上のプローブ DNA と反応させると、両者の配列が相補的に合致したときのみ結合 (ハイブリダイゼーション) が起こるため、どのプローブ DNA が蛍光を発するかを調べることで、ターゲット DNA の配列を決定できる。このような光学的手法以外に電気的な検出方法も提案されている¹⁾。本手法では 2 本鎖 DNA にのみ結合する化学物質を用い、本物質を介した電気化学反応を利用してハイブリダイゼーションの有無を判別する。蛍光検出装置が不要になるためシステムの小型・低価格が期待できる。

上記ではセンサに接続された電気回路は外部に設けられているが、すべてをシリコン LSI (Large Scale Integrated Circuit) 上に集積した例も報告されている (図 8・8)²⁾。0.5 μm CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスで作られた $6.4 \times 4.5\text{mm}^2$ のチップ上に、128 個のセンサアレイ、センサごとのアナログ-デジタル変換器、制御回路が集積される。ターゲット DNA に結合した酵素 (alkaline phosphatase) の作用により、基質から para aminophenol が生成され、センサ電極における para aminophenol の酸化・還元反応を通じて電気化学的検出が行われる。反応により生じる電流は微弱なため、センサ近傍でアナログ-デジタル変換を行うことで検出のダイナミックレンジ拡大が図られている。また、チップ上にセンサ、高周波通信回路、コイルを集積することでワイヤレス検出を実現し、検出自由度や安全性向上を図った報告もある³⁾。

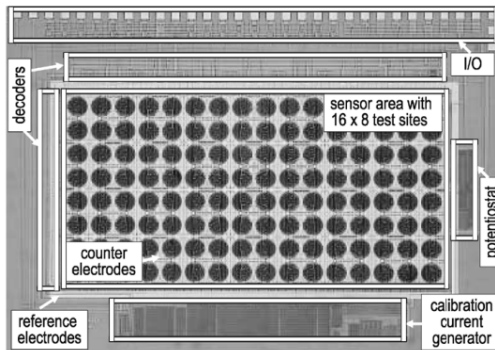


図 8・8 0.5 μm ルール CMOS 集積回路上に 128 個のセンサアレイを集積した DNA アレイチップ²⁾ (Copyright © 2004 IEEE)

電気化学的検出と並び、電界効果素子を検出に用いる報告は多い。古くは 1970 年まで遡り⁴⁾、シリコン MIS (Meta-Insulator-Semiconductor) トランジスタにより溶液中の NaCl 濃度を測定した報告がある。その後、シリコン MIS キャパシタや MIS トランジスタにより、DNA のハイブリダイゼーション検出が試みられている⁵⁾。プローブ DNA をゲート絶縁膜上に固定し、ターゲット DNA を含む試料を導入すると、ハイブリダイゼーションによりゲート絶縁

膜上に2本鎖DNAが形成される。DNA分子は水溶液中でリン酸イオンに起因する負電荷をもつため、ハイブリダイゼーションによりその電荷量が2倍になる。これによるフラットバンド電圧の変化を、キャパシタのインピーダンス測定やトランジスタの電流測定により検出する。また、バルクシリコン以外に、ポリシリコン薄膜トランジスタを用いた試みも報告されている⁶⁾。

DNAハイブリダイゼーションは様々な物理化学的変化を伴うため、上記以外にも様々なセンシング方法が考えられる。また、ターゲットDNAのラベリングまで許せば、その可能性は更に広がる。そのなかで、LSIとの統合を目指した研究例として以下の2例を記す。第1は、ターゲットDNAを磁気粒子でラベリングし、0.25 mm CMOS回路上のGMR (Giant Magnetic Resonance) 素子で検出する方法である⁷⁾。第2はFBAR (Film bulk acoustic wave resonator)を用いた検出であり⁸⁾、圧電材料であるAlN薄膜を金属で挟み込み共振器を構成し上部金属上にプローブDNAやタンパク質を固定化することで、ターゲット分子が上部金属上に結合する際の共振周波数変化を利用して検出を行う。また、FBARと同様、共振周波数変化をバイオアッセイに利用する技術としてQCM (quartz crystal micro-balance)がある。QCMでは共振周波数がMHzレンジであるのに対しFBARではGHzと高いため、FBARの方が1000倍高感度である。

以上、DNAのハイブリダイゼーション検出に関して述べてきたが、上記の技術は必ずしも本用途に限定されるものではない。抗原抗体反応、タンパク質間相互作用、受容体-レセプタ結合、レクチン-糖鎖結合などの用途にも展開可能と思われる。

DNAの配列情報を調べる方法として、上記のハイブリダイゼーション以外にゲル電気泳動を用いる方法がある。ゲルは有機材料の一種であり、その中にはナノスケールの分子ネットワークが形成されている。このため、ゲル中でDNAの電気泳動を行うと、DNAの塩基配列より決まる分子の大きさや形状に応じて泳動速度に差が生じる。近年、微細加工によりナノスケールの人工構造を形成し、LSI上でも利用可能なゲルの実現を目指した試みがある。LSIと親和性の高いシリコン酸化膜を用いてナノ柱構造アレイを作製し、この中でDNAの電気泳動を行うことで、塩基数に応じたDNAの分離が実現されている^{9), 10)}。また、柱構造の並べ方の工夫による分離特性制御など、有機ゲルでは実現できない高い機能性も確認されている⁹⁾。電気泳動分離はバイオ技術の基本の一つであり、本手法の応用もDNAに限定されない。タンパク質や細胞など、様々な対象物に適用可能である。

これまで、LSIのバイオ応用という観点で技術を見てきたが、バイオ技術のLSI製造への活用例も若干ながら報告されている。その代表として、タンパク質をナノドット形成のテンプレートに用いる方法を取り上げ説明する¹¹⁾。アポフェリチンは直径12 nmの殻状タンパク質であり、その内部に直径7 nmの空洞をもつ。タンパク質の形状はアミノ酸配列によって決まるため、空洞の形状も原子レベルで規定される。このため、この空洞に入り込んだ金属や金属化合物の形状も原子レベルで規定されることとなる。また、アポフェリチンの自己組織化特性を利用するとアポフェリチンを平面上に自己集合でき、その後アポフェリチンを焼いて除去することでサイズ制御されたナノドット配列を得る。このようにして得られたコバルト粒子をフラッシュメモリの記憶ノードに用いることで、不揮発メモリ動作を得ている。

■参考文献

- 1) K. Hashimoto, K. Ito, and Y. Ishimori, "Sequence-Specific Gene Detection with a Gold Electrode Modified with DNA Probes and an Electrochemically Active Dye," *Anal. Chem.*, 66, pp.3830-3833, 1994.
- 2) M. Schienle, C. Paulus, A. Frey, F. Hofmann, B. Holzapfel, P. Schindler-Bauer, and R. Thewes, "A Fully Electronic DNA Sensor With 128 Positions and In-Pixel A/D Conversion," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol.39, no.12, pp., 2004.
- 3) Y. Yazawa, T. Oonishi, K. Watanabe, R. Nemoto, M. Kamahori, T. Hasebe, and Y. Akamatsu, "A Wireless Biosensing Chip for DNA Detection," *Proc. of ISSCC 2005*, pp.562-563, Feb. 2005.
- 4) P. Bergveld, "Development of an Ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.17, pp.70-71, 1970.
- 5) E. Souteyrand, J. P. Cloarec, J. R. Martin, C. Wilson, I. Lawrence, S. Mikkelsen, and M. F. Lawrence, "Direct Detection of the Hybridization of Synthetic Homo-Oligomer DNA Sequences by Field Effect," *J. Phys. Chem B*, vol.101, pp.2980-2985, 1997.
- 6) P. Estrela, A. G. Stewart, P. Migliorato, and H. Maeda, "Label-Free Detection of DNA Hybridization with Au/SiO₂/Si Diodes and Poly-Si TFTs," *IEDM tech. Dig.*, 2004.
- 7) S-J Han, L. Xu, H. Yu, R. J. Wilson, R. L. White, N. Pourmand, and S. X. Wang, "CMOS Integrated DNA Microarray Based on GMR Sensors," *IEDM Tech. Dig.*, Dec. 2006.
- 8) B. Brederlow, S. Zauner, A. L. Scholtz, K. Aufinger, W. Simbürger, C. Paulus, A. Margin, M. Fritz, H. -J. Timme, H. Heiss, S. Marksteiner, L. Elbrecht, R. Aigner, and R. Thewes, "Biochemical sensors based on bulk acoustic wave resonators," *IEDM Tech. Dig.*, Dec. 2003.
- 9) M. Baba, T. Sano, N. Iguchi, K. Iida, T. Sakamoto, and H. Kawaura, "DNA size separation using artificially nanostructured matrix," *Appl. Phys. Lett.*, vol.83, 1468, 2003.
- 10) N. Kaji, Y. Tezuka, Y. Takamura, M. Ueda, T. Nishimoto, H. Nakanishi, Y. Horiike, and Y. Baba, "Separation of Long DNA Molecules by Quartz Nanopillar Chips under a Direct Current Electric Field," *Anal. Chem*, vol.76, p.15, 2004.
- 11) I. Yamashita, "Bio Nano Process: Fabrication of Nanoelectronic Devices Using Protein Supramolecules," *IEDM Tech. Dig.*, Dec. 2006.

8-2-4 光電子融合の将来

(執筆者：岩本 敏) [2009年1月 受領]

今日主として議論されている光電子融合とは、本節でも議論されたような、シリコン LSI などの電子デバイス中で行われている信号伝達について、光の高速性・独立性（それ自体では互いに相互作用しないという意味において）を利用しようという試みであるといえる。しかし、光電子融合という言葉の意味をより広い視点で考えれば、電子と光の有する独自の機能やその相互作用を利用して新たな物理を開拓しそのデバイス応用を図ろうという試みとして、より広く位置づけることができるのではないかと。また、テラヘルツ領域など未開拓領域に電子デバイス、光デバイスのそれぞれの立場から取り組む動きも、広義には光電子融合といえるものであると考えられる。

ここで、光電子融合を次のように分類してみたい。もちろん、この分類に絶対的意味があるなど主張するつもりはないこと、ご了解いただきたい。ここでは高性能化と新機能の創世は明確に区別して位置づける。

- (1) 電子技術（デバイス）に光技術を、光技術に電子技術を取り入れ、従来の機能を高性能化する。
- (2) 未踏領域を光と電子の両面から開拓する。
- (3) 光、電子それぞれの機能を融合して新たな機能を生み出す。

エレクトロニクス技術に光配線技術を組み込もうとする、現在議論されている光電子融合技術は(1)の範疇である。また電氣的発振器とレーザの両面から開拓が進められているテラヘルツ領域の技術は(2)に属する(8-1 節参照)。(1)に属するシリコン集積回路への光技術の導入については、参考文献 1) にその内容と取り組むべき課題が見事にまとめられている。また、シリコンフォトニクスと呼ばれる関連分野の最近の技術動向が参考文献 2) にまとめられている。現在の技術を改良し光配線技術のエレクトロニクスへの導入を目指すことは言うまでもないが、この分野の今後の大きく難しい課題として、シリコンベースの光源の開発をあげておきたい。

光電子融合技術の将来は、(1),(2)を発展させるとともに、従来の光電子融合の枠を超えて(3)のような技術領域を開拓することにあるのではないと思われる。(3)はこれまで実現できている機能の高性能化ではなく、真に新しい機能を創世するものである。LSI 分野の言葉を借用すれば“Beyond 光融合”と言えなくもない。

(3)の範疇に何が見出されるかを議論すること自体が今後の課題といえるが、光と電子の相互作用の利用による新機能創出は含まれるであろう。光デバイスとして扱われるものの、レーザなどのデバイスは電子と光の相互作用を利用して新たな機能を生み出した好例である。現在では、光による電子(物質)の制御技術が盛んに研究されており、近い将来には新しい原理・機能に基づく情報処理・伝送技術やその他の機能の実現につながるものと期待される。更には、電子(物質)を光との結合状態(例えば励起子ポラリトンなど)として利用することで、それぞれの特徴をうまく利用した新たな情報処理デバイスが生み出される可能性もある。また、光と電子(物質)の相互作用を利用して、光により長距離伝送された量子ビットを、電子(物質)により保持・演算しようとするような量子中継器(技術)やそれを用いた量子ネットワーク、更に発展して量子分散処理などが検討されている。これは光と電子の独自の機能を融合して、従来にない機能を実現しようとする試みの一つと位置づけられるであろう。

そもそも予期しないことが起こるのが研究の醍醐味でもあり、光融合技術においても現段階では全く予想もできない形で新機能が実現されるかもしれない。その意味で、本知識ベースの改訂時には、本項目で述べた内容と全く異なるような技術展開が実現されていることを期待する。

■参考文献

- 1) 林 巖雄, “光と電子の集積化 -シリコン集積回路の限界と光インターコネクション-,” 応用物理, vol.65, 824, 1996.
- 2) “特集「シリコンフォトニクス」,” 光学, Jan. 2008.

■S2 群-2 編-8 章

8-3 MEMS/NEMS

(執筆著者：小野崇人) [2009年9月 受領]

半導体加工技術を基盤としてマイクロスケールの電気、機械、光要素を集積化した小型システム、あるいはこの小型集積化技術をマイクロ電気機械システム (Micro-Electromechanical Systems) と呼ぶ¹⁾。また、構造体の最小加工寸法が 100 nm 以下の場合をナノ電気機械システム (Nano-Electromechanical Systems) と呼ぶことがある。日本ではマイクロマシン、欧州ではマイクロシステムとも呼ばれる。MEMS 加工技術は近年急速に発展したもので、LSI を製造する一括加工技術に加えて、より立体的な構造体を作製する技術や接合・張合せ技術、厚膜レジスト技術など多様な技術を組み合わせたものである²⁾。MEMS/NEMS は主に、物理・化学量を検出するセンサと駆動機能をもつアクチュエータの二つの機能の組合せから構成される。これらは、ある物理量を別の物理量に変換するため、変換器という意味をもつ“トランスデューサ”とも呼ばれる。

近年、工業、産業、医療や科学などの分野で様々な MEMS が実用化されはじめており、システムを構成するための主要な部品として使われている。加速度センサや角速度センサなどの慣性センサが自動車の安定走行やナビゲーションのために利用されているほか、携帯機器、ゲーム機に搭載されている。最近では、LSI 上に MEMS を集積化した慣性センサが多く実用化されている。また、小型のミラーを複数個並べたデジタルマイクロミラー (DMD) がスクリーンに映像を投影するプロジェクタの素子として広く使われている。なお、MEMS はそのサイズから光学要素と相性が良く、光源や検出器、レンズ、回折格子などを集積化したシステムは光 MEMS と呼ばれる。高周波の RF 信号を機械的なマイクロリレーで ON-OFF する RF スイッチが LSI テスタなどの計測器に利用されはじめたほか、RF フィルタなど様々な RF 部品の研究が進められ、これらのシステムは RF-MEMS と呼ばれている³⁾。インクジェットプリンタのヘッド部分には、MEMS 技術で作られた微量液滴の突出を制御する素子のアレイが使われている。また、微量な生化学物質や細胞を微小な流路中でハンドリングし、分析や合成を行う micro-TAS (Micro-Total Analysis Systems) や Lab on Chip の開発が進められている。微小な圧力センサが開発され、カテーテル先端での計測など新しい応用が広がりつつある。また、小型の燃料電池や発電装置など power MEMS が注目されている。

これらは半導体加工技術を基盤とした一括加工技術で生産されることを特徴とする。つまり、構成部品を一つずつ組み立てる必要がなくウェハレベルで作製した後、個々のチップに分割される。大量生産により製造コストが低減できる。また、ウェハレベルでのパッケージングによりその後のパッケージング工程が不要になる。

MEMS/NEMS は LSI で使われる材料である単結晶 Si や poly-Si を主要な機械構造部材とすることが多い。単結晶 Si は欠陥が少なく、鋼よりも大きな降伏強度をもち、また室温で機械的なヒステリシスや塑性変形ないことなどから、最もよく利用される。ほかに酸化膜や窒化膜、金属膜など、LSI との適合性をもつ材料が広く利用される。パッケージング部材としてパイレックスガラスやポリマーが使われる。一方、アクチュエータの材料として PZT 薄膜が用いられるほか、AlN や ZnO などの圧電材料も高周波素子の材料として利用されている。高温や高防食環境下でも利用できるセンサ材料として SiC やサファイヤなどが研究されている。

ポリイミドやバリレンなどのポリマーが構造体や保護膜、接合のための接着層として用いられ、ほかに使い捨ての必要性のあるバイオ・化学チップでは、モールドで形成したシリコン樹脂の構造体が使われる。プラスチックからなるフレキシブル基板などもディスプレイ応用などで用いられつつある。また、カーボンナノチューブなどのナノ材料をエミッタやプローブ顕微鏡の探針として利用する研究も進められている。

製造プロセスは大別すると、膜堆積、リソグラフィ、エッチング、及び組み立て・パッケージング工程からなる。このうち、膜堆積、リソグラフィ、エッチングが基本プロセスであり、この工程の組合せと繰り返しにより、複雑な構造体が作られる。最終的な工程では除去してしまう犠牲層を用いることで、機械的に自立した構造体が作製される。

MEMS において特徴のあるプロセスの一つは、深堀反応性イオンエッチング (deep-RIE) を用いたエッチングである⁴⁾。特に Si の deep-RIE 技術は発達し、アスペクト比が 30 以上の構造体の形成が可能である。Deep-RIE でよく用いられるのは、ボッシュ社が開発した“ボッシュプロセス”と呼ばれる手法で、 SF_6 ガスを用いた等方性エッチングと C_4F_8 などのガスを用いたポリマーの堆積を交互に繰り返して基板に垂直に、しかも高速にエッチングする。Si 以外にポリマーやガラス、Ti などの金属で Deep-RIE の研究が進められている。一方、シリコンの複雑な形状を形成するのにシリコンウェハのアルカリ溶液による異方性エッチングが用いられる。これはシリコンの結晶面によってエッチング速度が異なることを利用したものである。

MEMS では、最大で数 100 μm の厚さの厚膜レジストが使われ、高いアスペクト比をもった構造体が形成される。X 線を用いたリソグラフィと金属メッキによるモールドの技術は LIGA プロセスと呼ばれる。異方性エッチングなどで形成した凹凸の上にレジストを噴霧法によりコーティングし、フォトリソグラフィでパターンを形成する方法も用いられる。直接立体構造を作る手法としては、光感光性樹脂を光によって少しずつ固めて形成する光ステレオリソグラフィが知られている。

センサを真空に封止したりするため、ガラスとシリコンの陽極接合による真空封止技術が用いられる。近年では、キャビティーの上に形成した微小な穴の上に膜を堆積して封止するなどの技術が使われるほか、プラズマ活性化接合技術などにより室温で異種材料の接合が可能になり応用が広がりつつある。

最近では、LSI の集積度の限界から、LSI の付加価値を上げるために異種要素である MEMS を LSI 上に形成して付加価値を高める研究が進められている。高周波部品、センサ、通信機能などを一体としたユビキタスセンサなどがその応用の一つと考えられている。また、携帯電話で使う CCD カメラなどを半導体プロセスで作るなど、従来の精密部品の製造と組み立てが半導体工場で行われるなど、製造方法に変化が起きつつある。

■参考文献

- 1) 江刺正喜, “はじめての MEMS,” 工業調査会, 2009.
- 2) M. Madou, “Fundamentals of microfabrication,” CRC press, 1997.
- 3) G. M. Rebeiz, “RF MEMS Theory, Design, and Technology,” John Wiley & Sons, 2003.
- 4) A. M. Hynes, et al., Sensors and Actuators, vol.74, 13, 1999.