

MakeLSI: 集積回路が真の道具になるために

秋田 純一(@akita11)

1.はじめに

半導体技術、特に集積回路に関する技術は、ムーアの法則に基づく微細加工技術の進展によって継続的な進化を遂げてきた。その結果、コンピュータの劇的な高性能化・小型化・低価格化が達成され、それらは現代の高度情報化社会や、その先のユビキタス社会を支える重要な基盤となってきた。その一方で、半導体技術、特に設計技術と製造技術が高度に複雑化・専門化されたことにより、それらに要するコスト（人的コスト、ツールのコスト、製造工程のコスト）が急激に増大してした。特に設計コストとマスク製造などの初期投資費用の高騰は、半導体製品の極度なアプリケーション特化と、その初期費用投資の回収の観点からの必要量産数の増加という現実と直面して、その結果、半導体製品が使用される電子機器の市場動向や製品動向に、半導体産業が技術的にも経済的にも大きく依存せざるを得ない状況が長く続いている。そのことが、本来は基盤技術であるはずの半導体産業の健全な発展を阻害する要因となっている場合が多い。またこのような集積回路の導入の敷居が上がったことが、教育的にも産業的にも集積回路のユーザの多様性を狭めている現状がある。

ここではこのような半導体技術、特に集積回路技術の現状をふまえて、情報技術の実現手段である集積回路が、多様なユーザにとっての真の「道具」になることの意義、およびそのために必要なことと、それに向けた動きについて俯瞰する。

2.ムーアの法則

ここで、半導体、特に集積回路に関する技術の進化の指標、かつ技術的裏付けとなってきた「ムーアの法則」について、その歴史と現状について俯瞰する。

2.1 ムーアの法則の歴史

まず半導体、特に集積回路に関する技術の進化を考察する上で外すことができない「ムーアの法則」について簡単にまとめておく。ムーアの法則とは、R.H.Dennardらが示したMOSトランジスタの比例縮小による効果⁽¹⁾に基づいて、半導体産業のそれまでの成長と今後目指すべき方向性について、Intel社のG.Mooreが提唱した法則であり、加工寸法が3年で1/2となる（べき）というものである。このムーアの法則が示す、MOSトランジスタの微細化による集積回路、およびそれを部品とするコンピュータをはじめとする電子情報機器の性能向上とコストダウンは、一般にはメ

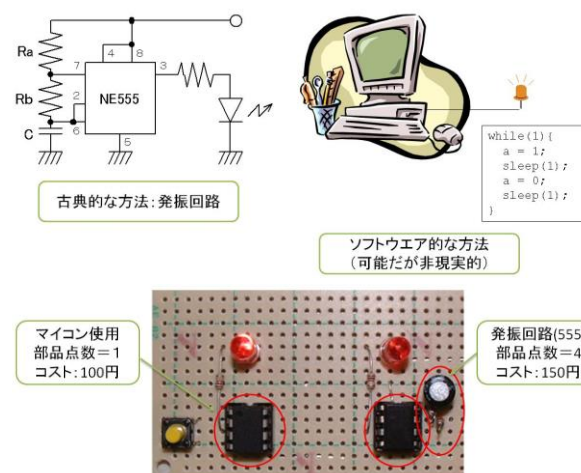


図1 Lチカ (LED チカチカ) を実現する様々な方法

一カ側にとっては製品価格を維持した上での性能向上（大容量化）による機能単価の低減という製品付加価値の向上を達成でき、また慢性的に高性能を欲している（機能飢餓状態）ユーザ側にとってはそれを満たしてきた。つまりムーアの法則の恩恵は、メーカとユーザの双方にとって極めて魅力的なものであったため、半導体産業の技術開発の方向性を極めて明確に示すものとなった⁽²⁾。その結果、数々の技術的な困難にぶつかりつつも、技術革新によってそれを乗り越え、ムーアの法則の通り、あるいはそれを上回るペースで微細化と高性能化が進展してきた。

2.2 ムーアの法則の現状

ムーアの法則は、必然的にMOSトランジスタや回路配線の微細化を促すが、その加工寸法には、原子サイズという物理的な限界や、それ以前に漏れ電流や製造ばらつき、膨大な規模の回路の設計・検証技術など、現実的な制約が数多く存在する。本稿では、More MooreやMore Than Mooreと呼ばれる、ムーアの法則の技術的な限界とそれを超える方向性についての研究や議論については触れないが、以下で、ムーアの法則と半導体産業の現状について考察を加える。

このような半導体製造技術の微細化の進展の結果、製造のための費用、特に製造装置の費用が高騰してきた。また同一チップに集積される回路規模の急激な増大により、初期コストである設計・検証のためのコスト（人的コスト・ツールのコスト）も急激に増大してきた。これらの半導体製造にかかる費用高騰は、もはや一企業の負担の範疇を超えてきており、半導体産業の再編と淘汰が進んでいるのは

よく知られているとおりである。またこのような初期コストの高騰は、必然的にその回収のために、1つの半導体製品を相当数、量産することが求められる。しかし集積回路の高性能化と SoC (System on a Chip) に代表されるような高度な機能集積は、必然的に用途が特定されるために特定製品への依存が強く、量産効果をあげにくいというジレンマがある⁽⁴⁾。その結果、例えば一部のスマートフォンに自社の SoC (System on a Chip) が採用されるか否か、または SSD などの大口顧客である特定製品の市場動向などが、半導体メーカー自身の命運を左右するほどになっている。しかしこのように特定の製品・品種に強く依存することは、極めて経営的なリスクが高く⁽⁵⁾、産業として健全とは言い難い。

一方、このムーアの法則のもう一つの効果である集積回路の「低価格化」は、単なる機器の低価格化にとどまらず、集積回路製品の使い方の概念そのものを根幹から変えうる可能性を秘めている。例えば「(ワンチップ) マイコン」は、教科書レベルの基本的なアーキテクチャのコンピュータに、メモリや周辺回路を集積したものであり、それに使われる製造技術は、高性能プロセッサのような最先端の微細加工ではなく、数世代も前のものである。すなわちマイコンは「枯れた」技術の集積であるが、「コンピュータの使い方」そのものを根幹から変えうる可能性と、それに伴う半導体市場の質的・量的な変化・拡大の可能性を秘めている⁽⁴⁾。例えば LED を点滅させる「L チカ (LED チカチカ)」は、古くは発振回路を用いて実現するのが一般的であった。一方、PC の USB ポートにインタフェース用の IC を介して LED を接続し、プログラム制御によって LED を点滅させることも技術的には可能であるが、さすがに「もったいない」といえる。すなわち、パーソナルコンピュータを用いた L チカは、可能であるが現実的ではない (図 1)。ところが同じコンピュータでも、マイコンであれば、L チカが可能であることはもちろんであるが、費用面や機能面などの様々な面で、「マイコンによる L チカ」は、現実的な方法となる。すなわち、枯れた技術の集積であるマイコンが、コンピュータの使い方のパラダイム自体を変え (広げ)、それにあわせて半導体製品市場の質的・量的な変化をもたらした、と見ることができる。このような、必ずしも最先端ではない技術による集積回路がもつ意義と可能性については次節以降で詳しく俯瞰・議論する。

3. 技術の民主化とその意義

3.1 技術の民主化とその意義

近年、電子回路を含む、いわゆる「ものづくり」の世界において、いわゆる「MAKERS (メイカー) ムーブメント」と呼ばれる世界的な活動の広がりがある。MAKERS ムーブメントには多角的な側面があるが、例えば MIT の N. ガーシェンフェルドが「How to Make (almost) Anything」という演習を通して提唱し、世界的な広がりを示す FabLab⁽⁶⁾は、産業革命以降分離してきた技術とそれを使う人、ものを作る人と使う人が、ルネッサンス時代と同じく融合し、つく

る技術を大衆の手に取り戻す「製造技術の民主化」を実践している。これは、一般のユーザ (アマチュア) が、それまでは扱うことが非現実的であった 3D プリンタやレーザーカッター等のデジタル制御加工装置の進化と普及によって、それらの道具を手に入れ、従来は製作することが非現実的であったものを製作することが可能となったことを背景として、「作る」という行為を、製造業だけでなくユーザである市民が実践できるコミュニティのあり方を模索している。このように、「技術がある」ことと「技術が普及する」ことの間には大きな壁があり、「技術が普及すること」が社会のあり方の質的な変化をもたらさう点は注目すべきである。

また C. アンダーソンは、音楽配信サービス業界の分析をもとに、電子データ産業では、需要がほとんどないようなマイナーな製品とその需要が存在し、しかもそれらの種類が膨大であるために、総和では産業としては無視できない規模になるという「ロングテール」⁽⁶⁾の概念を提唱している。これは、ユーザが限られた種類の製品から選ぶという 18 世紀の産業革命以降の枠組みから、選択肢が十分に広がったことで多様な嗜好を持つユーザが真に必要とするものを選ぶという、産業の枠組みの変革を示唆するものである。実際、近年は一部のヒット商品よりも多くの非ヒット商品が存在するという傾向は、多くの業界で見られることが示されている。そもそも製造業において、商品の種類を制限することは、「黒である限り何色の自動車でも手に入る」という H. フォードの言葉⁽⁷⁾に象徴されるように、生産者側の効率化の都合であるといえる。しかし産業の本来の目的は人類の幸福であり、そのためには、限られた種類の商品という生産者の都合をユーザに強制するのではなく、ユーザの視点・ニーズに産業が応えるのが理想である。そして少なくとも電子データ産業では、それが可能となってきているという点は、ユーザ・メーカーの双方の視点から学ぶべきことは多い。

そしてこれらを背景として、MAKERS ムーブメントと呼ばれる、21 世紀の産業革命とも比喻される全世界的な活動が大きく拡大してきている。前出の C. アンダーソンは、3D プリンタなどのデジタル制御製造装置によるプロトタイプ試作と、市場調査とスタートアップ資金調達、および熱心な顧客獲得を兼ねるクラウド・ファンディング (crowd funding)、そして部品のサプライチェーンの活用によって、必ずしも大規模ではないものの、ユーザの嗜好にあい、かつ愛着のある製品を生み出す製造業のあり方を考察している⁽⁸⁾。このような産業形態では、製造者がアマチュアのように強い愛着を持つことが、スタート時点では極めて重要な意味を持つが、それに共感する熱心なユーザをつなぐ SNS のようなネットワークコミュニティが存在するからこそ産業として成立しうる⁽⁹⁾。このような産業の形態は SF 作品⁽⁹⁾の中だけでなく、実際、「一人電機メーカー」と呼ばれる Bsize 社をはじめとして、旧来の製造業が対象にする 10 万個以上ロットではないものの、ユーザが愛着を持って長く愛用す

る製品を製造する「メーカー企業」と呼ばれる企業が国内外において現れている^(3,8,10,11)。これらのメーカー企業の製品は、先の「ロングテール」の概念ともよく符合する。すなわち必ずしも世の中の多くの人が持っている大ヒット製品ではないが、そもそもユーザの嗜好は多種多様であり、それに応えるために製品は多種多様（従って製造数は少量）になる産業の姿を實踐し、具現化している例でもある。このような、小ロットであるものの、多種多様（しかし総和は大きい）でしかもユーザに密着した製品こそ、これまでの均一製品（平均的には満足されるが、ユーザの多様なニーズのすべてには合致しない）の大量生産を至上とする製造業が抱いてきたパラダイムから脱却すべき時代であることを示唆するものであると思われる。

もちろん全ての工業製品がメーカー企業向きではなく、均一な大量生産が適した製品も間違いなく存在し、それは将来も消えることはないであろう。すなわち MAKERS ムーブメントは、旧来の大量生産・大量消費を否定し、それを置き換えるもの、ととらえるべきではなく、それを補い、あるいは相乗効果をもたらすもの、すなわち製造業・産業の多様化という文脈でとらえるべきものである。

このような動きが可能となった背景の一つに、アマチュアでも利用可能な製造技術（回路設計、プリント基板製造、部品調達、筐体設計・製造など）が現れてきたことは注目すべきである。これらの製造技術は古くから存在し、進化してきたが、その結果、高度に専門化・複雑化し、アマチュアが望むような小ロット生産や、（しばしば技術的に無理のある）多様な要求に応えることが困難となり、事実上アマチュアの手から離れ、製造者と利用者が分断された。しかしこれらの技術が十分に高度になり、かつデジタル技術と融合したことで、アマチュアの要求に応えることが可能となり、かつそれを活用するユーザコミュニティの形成により、製造技術（の一部）が再びアマチュアの手に戻る、すなわち製造技術の民主化とも呼ぶべき現象が、このような多様な製造業の形態を可能としたことの本質であるといえる。

実際、例えばアマチュア DIY の祭典として米国で始まり、近年は日本を含めて世界各地で頻繁に開催されている **Maker Faire** では、旧来の製造業とは全く異質の「ものづくり」が披露され、その中から産業として成長していく多数の実例を見ることができる。特にこのような活動を担う人たちの多くが、旧来の製造業とは縁がない純粋なユーザであることは、ユーザの質的な変化が、イノベーションを起こす場合⁽¹²⁾が生まれてきていることを示唆している。

このような専門性の高いユーザ層の質的な変化、特にその属性・興味の多様化は、もちろん技術レベルの低い初心者も含まれるために、業界全体の平均では質が低下するものの、その幅が大きく広がり、その中から真のイノベーションが生まれうる素地になることが示されている⁽¹³⁾。このような技術の民主化とそれに伴うユーザの質的な変化は、従来技術の延長では決して達し得ないようなブレイクスル

ーを生む可能性を秘めている。

3.2 電子工作技術の民主化

前述のムーアの法則によるマイコンという概念の誕生や MAKERS ムーブメントと関連し、それまでは回路設計エンジニアや電子工作マニアのものであった回路設計・電子工作の世界においても、技術が広く普及し、それまではそのような分野に縁も興味もなかった人たちにまでユーザ層が広がる、電子回路・電子工作の民主化とも呼ぶべき現象がおきている⁽¹⁴⁾。

なお技術が広く普及することで、作り手と受け手の境界の敷居が低くなり、受け手側から作り手が現れる、いわゆる **Consumer Generated Media** は、音楽などの文化では近年広まっており、質的な変化が起こっていることが知られている⁽¹⁵⁾。

その背景の一つに、マイコンボードなどの電子工作のための道具を、ツールキットとしてモジュール化・パッケージ化し、コンピュータの扱う世界を外の物理的世界まで広げる目的の「フィジカル・コンピューティング」と呼ばれる分野⁽¹⁶⁾がある。これは一般には、使いやすくまとめたマイコンボードと、多くの場合はフリーソフトウェアの使いやすい開発環境の存在をベースとするものであり、その点では旧来の多種多様なマイコンボードと変わらないが、それに加え、その設計データやソフトウェアが、ノウハウをユーザが共有できるオープンソースハードウェアとして公開され、また開発改良を活発に行う充実したユーザコミュニティの存在を大きな特徴とし、**Arduino** シリーズ⁽¹⁷⁾は、その代名詞とも呼べるものである。これらのマイコンボードも開発環境も、技術的には特筆すべき優位性があるわけではないし、著者が初めてこれらに接したときは、正直、たいしたものではない、という感想を抱いた。しかしソフトウェア・ハードウェアを使いやすくまとめるパッケージ化と、コミュニティを通じたノウハウ共有・相互啓発によるユーザ層の拡大は量・質ともに劇的なものであり、それに加えて回路設計 CAD やプリント基板製造サービスの普及、および電子部品のサプライチェーンの普及とも相まって、それまでは技術者や電子工作マニアだけのものであった電子工作・回路設計を、個々のニーズ・目的をもつクラブ制作者のような個人の趣味や ICT 業界のプロフェッショナルなどの幅広い層のユーザが、それを手段として用いて創作・製作活動を行うようになった。このフィジカル・コンピューティングは、前述の MAKERS ムーブメントの強い裏付けにもなっている。

このような「技術の民主化」は、技術者の意義が揺らぐ「技術者に対する脅威」と見ることもできるが、それよりはむしろ、技術のユーザの幅が広がることで、逆に技術者の意義が明確となり、技術者の価値が高まることにつながる⁽¹⁸⁾。例えば文章を書くための **MS Word** が普及したからと言っても文筆業はなくならないし、動画編集が身近なものとなっても映像作家や映画監督という職業は存在し、ユーザが情報を発信する **Web2.0** の時代でも、ジャーナリスト

の重要性はゆるがない。だからこそ集積回路や電子回路も、民主化され、使う人と使われ方を多様化すべきである。

4.集積回路が「道具」になるために

本節では、これらの背景を踏まえ、本来は具現化の手段である集積回路が、あらゆる人が利用できる真に「道具」となることの意義と課題、およびその将来について議論する。

4.1 集積回路が「真の道具」となることの意義

ここまでみてきたように、技術が民主化され、多様なユーザが、自らの目的の具現化のために多様な使い方をできるようになることは、産業のみならず社会の質的な変化をもたらす。しかしながら半導体技術、集積回路技術に目を向けると、前述のように、それに要する費用の高騰とそれに伴う高度な専門化により、「技術の民主化」が阻まれている。すなわち、集積回路を設計・製造する技術・手段は、本来は「作りたいものを実現するための手段」であるはずが、現状では一部の「持てるもの」の特権となっており、必要な全てのユーザが手にすることはできない。そのため、現状では大半のユーザには、「いまある半導体製品」を使ってできること、という制約が存在し、発想も事業の進め方も、その枠を超えることは困難な場合が大半である。またそのような現状が、集積回路に関連する産業や研究コミュニティの閉塞感にもつながっている。

ここで逆に、それらの制約が存在しない未来を考えてみる。すなわち、例えばプリント基板が歩んできた道のように、設計技術や設計 CAD が一般化して誰でも使えるようになり、安価で短納期の小ロットの試作サービスが実現し、設計・製造のための知識が十分に共有され、誰でも手軽に集積回路を作って使う（そして失敗する）経験をふむことが現実となったとする。そうすると、現在からは想像がつかないほどユーザの幅が広がり、かつては半導体を使ったことすらない層にまでユーザが広がり、彼らが、半導体技術者が想像すらできない使い方、アプリケーションを考案し、実装していく。その中にはもちろん、お遊びレベルのものも多く、技術的には箸にも棒にもかからないものも多いに違いない。しかし前述のように、このような多様なユーザが多様な使い方をする中から、真のイノベーションは生まれうる。また教育的観点からは、このように集積回路を「勉強」することのハードルが高すぎることは大きな弊害となる。東京大学 VDEC⁽⁴⁹⁾のような教育システムによって大きく進歩したものの、現状ではやはり、「勉強」として集積回路をつくることは、必要な知識・スキルや費用面から、とても手軽にできるものではない。しかし実際に集積回路をつくる経験ができないために、測定や改良ができ

ず、実際に動く集積回路をつくることができないという袋小路の状況に陥っている。原田がプログラミングの勉強における「遊びの経験」の重要性を指摘している⁽²⁰⁾のと同様に、集積回路でも「作って失敗してそこから学ぶ」経験は、極めて有効であるものの、現状ではそれができない。このような点からも、集積回路技術は「真の道具」になるべきである。

幸い、ムーアの法則の恩恵により、最先端の微細加工を用いなくても実現可能な技術レベルは高くなっており、それらで要求が達成可能な応用分野の幅は大きく広がっている。すなわち微細化のみが産業としての半導体集積回路の目指すべき道ではない。集積回路がこのように「真の道具」になるための課題とそれを克服する実践について、次節で述べる。

4.2 集積回路を「つくる」ためのハードル

現状で、集積回路が「真の道具」となる民主化を阻んでいる主な要因は、以下のものであると言える。

- ・ 安価・手軽な設計ツール
- ・ 安価・手軽な製造ツール・サービス
- ・ 情報共有のためのユーザコミュニティ

まず設計ツールは一部ベンダの独占状態であるが、それらは高性能な集積回路の設計のため、また集積回路を「つくってみる」ことが高価であるために、失敗しないような検証の機能が高度に複雑化しているおり、「ちょっとした集積回路」をつくるためには機能過多であり、その使い方のノウハウも共有されにくい。しかもそれらはとても個人で使えるような価格ではない。

また製造ツール・サービスも、台湾 TSMC などが最先端プロセスでの集積回路試作サービスを提供しているが、とても個人で使えるような価格ではない。非先端プロセスの比較的安価（ただし 20 万円程度）の試作サービスもいくつかあるが、設計ルールに関する秘密保持契約(NDA)が厳しく、個人で手軽に使えるものではない。

さらにこれらの「集積回路のつくり方」だけでなく、その上手い使い方の共有や相互啓発といった、フィジカル・コンピューティングのようなユーザ・コミュニティが決定的に不足している。これは、集積回路の敷居が高くなったためにユーザ（それを勉強・研究する学生も含む）の多様性が著しく減少していることと密接に関連している。

4.3 集積回路を「つくる」実践

本節では、これらの課題を解決する方策を模索するため、著者が実践している「Lチカ LSI」について述べる。これは「Lチカのような単純な用途のためだけに集積回路をつかう」という概念を具現化することを通して、集積回路が真の道具となる 1 つの姿を示すものである。

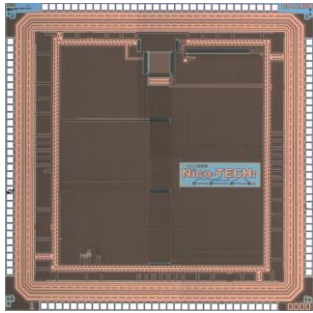


図2 試作したLチカ用LSI ver1のチップ写真

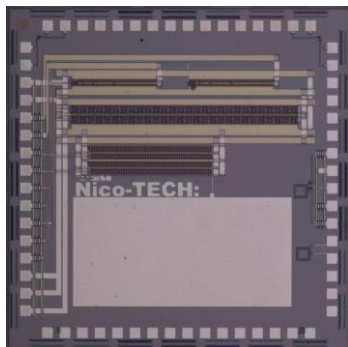


図3 試作したLチカ用LSI ver2のチップ写真

最初の「LチカLSI」(図2)では、1001段のリングオシレータとT-FFによる分周回路をCMOS 0.18[μm]テクノロジーでのLSI上に集積して試作し、その過程を動画⁽²¹⁾で公開した。この動画に対しては、「わざわざLSIをつくらなくても・・・」「マイコンやFPGAでいいよ」というコメントが多数寄せられた。たしかに「Lチカを実現する手段」としては、カスタム集積回路をわざわざ作る必要はない。しかし繰り返し述べているように、「つくりたいものを実現するための手段」として「カスタム集積回路をもつ」ことは、「既存の集積回路を使うしかない」という制約がある現状とは異なり、半導体集積回路のユーザとそれらが生み出す世界、イノベーションの質的な変革をもたらす可能性を秘めている。ただしこのような道具としての集積回路としては、「カスタム集積回路ならではの」使い方であることが望ましい。

そこで2つめの「LチカLSI」として、同様の回路構成のリングオシレータの出力に最上位層メタルでの負荷容量電極を接続し、その電極に指を近づけることで発振周波数が変化する、簡易なタッチセンサ機能を集積したもの(図3)を試作した⁽²²⁾。またここでは、光センサの機能を統合する可能性を示すため、フォトダイオードからなる簡易な光センサ回路も集積した。このようなセンサ機能の集積は、カスタム集積回路ならではの使い方であるといえる。またレイアウト設計は、高価なCADツールを使わずに設計する例を実証するために、フリーウェアの描画ツールであるInkscapeによってゲートや拡散、コンタクトなどのマスクを構成する図形を長方形で描画することでレイアウト設計を行い(図4)、それを自作のGDSデータへと変換するス

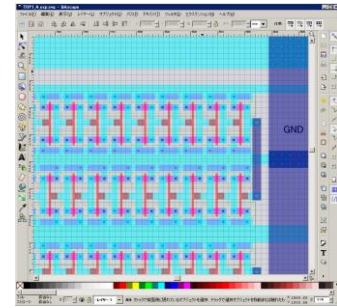


図4 Inkscapeでのレイアウト設計

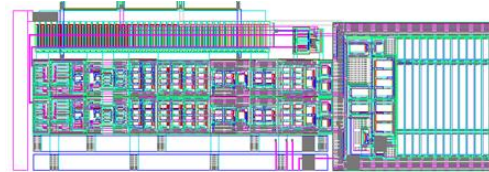


図5 設計した「555」機能回路のレイアウト図

クリプトを用いてマスクデータの作成を行った。このチップは、北九州学研都市 共同研究開発センターのクリーンルームにおいて、学生実習の一環として製造された。

この他に、ARM社が教育研究用途に提供しているCortex-M0プロセッサのHDLソース⁽²³⁾を用い、それにLチカのプログラムをコンパイルしたバイナリコードを命令メモリとしてHDL記述したもの、およびLED点滅のためのメモリ空間にマッピングされたPWM回路のHDL記述したものをあわせてFPGA上に実装してのLチカも試みた。これは、プロセッサに必要な機能・周辺回路を集積して、特定用途のプロセッサを、アマチュアが自分用に持つことが可能となることを示すものであり、これも集積回路の民主化の一環といえる。

またFPGAでは実現できない機能としてアナログ回路があるが、アナログ回路も自由に設計・実現することができるカスタム集積回路の特長を示すため、アナログ回路でのLチカの定番ICといえる「555」の機能をCMOS 0.18[μm]テクノロジーで設計(図5)した⁽²⁴⁾。

これらはいずれも、「そんな簡単なこと・・・」と思われる方も多いのではないかと思う。しかしArduinoなどのフィジカル・コンピューティングに対するエンジニアの感想と、実際に社会で起こった変革とを思い返せば、そのような簡単なことであっても、専門家ではない「素人」がそれに触れ、それを活用して使うようことで、ユーザの質的な変革を起こしうることを心に留めるべきであろう。

電子回路の面からも、回路構成の工夫やその評価が、実際の集積回路として具現化でき、かつその敷居が下がることは、教育面で大きなメリットがあるのみならず、目的やニーズの多様化によって、それぞれの目的を達成するために電子回路技術を活用することができるという点で、電子回路技術とそれに関わるコミュニティにも大きなメリットがあると考えられる。

4.4 MakeLSI:

このような、集積回路が「真の道具」になると可能なこと、真の道具になるからこそ可能となることを探索し、その情報を共有し、相互啓発するユーザ・コミュニティを形成・発展していくことは、前述の集積回路が「真の道具」になるための課題の解決とあわせて、今後積極的に取り組まれるべきである。その一環として、著者は2014年から、プロフェッショナルに限定しない集積回路設計・製造の方策を模索するために、「MakeLSI:⁽²⁵⁾」という活動を行っている。これは、フリーウェアなどの非商用の設計ツールを用い、また秘密保持契約(NDA)が不要な集積回路製造サービスを利用しながら、集積回路設計・製造に関する知見と経験を蓄積していく試みであり、2015年12月現在84名の参加登録があり、基本的にメーリングリスト(Google グループ)を用いて情報共有を行っている。

プロジェクトへの参加条件はなく、基本的に誰でも参加可能である。集積回路設計の経験がある人も多いが、まったくの未経験者も多い。

使用する設計ツールとしては、東京大学 VDEC の浅田邦博先生から、レイアウト設計ツール Wgex を提供していただき、基本的にはこれを利用している。同ツールにはレイアウトからの回路抽出機能があり、その結果を用いて、Linear Technology 社のフリーウェアの回路シミュレーションツール LTspice を用いて回路シミュレーションを行う。また東海大学清水尚彦先生から論理合成・配置配線ツールである Alliance の提供を受け、これを用いた設計フローの構築を進めている。

なお設計で「部品」となるスタンダードセル(基本論理ゲート)やオペアンプ等のアナログ IP は、有志で作成しながら GitHub に蓄積を進めている。

実際の集積回路の製造方法としては、福岡県北九州市の北九州学研都市共同研究開発センターのクリーンルームを用いる集積回路製造実習の協力を得て、2[μm]ルールでの2014年と2015年の8月に製造を行った。2015年度の製造では、8人・グループから10種類のレイアウト設計データを2つのチップに相乗りさせて製造した。なお製作は、(株)スイッチサイエンスと金沢大学の共同研究として実施された。またこの製造では MOS トランジスタの特性を測定する回路(TEG)も設計し、その評価も行った。ただし製造ばらつきに起因する特性の不安定性が顕著であったため、その原因究明を行っている。またこれと並行して、フェニテックセミコンダクター(株)のシャトルサービスを利用して、個別に秘密保持契約(NDA)を結ぶ必要のない、制限よりも緩い汎用の、いわゆる λ ルールに近い ScalabelCMOS⁽²⁶⁾ルールを基礎とする1[μm]程度の設計ルールでの設計ができるよう、設計フローの整備を進めている。こちらは、可能であれば北九州クリーンルームでの製造とスケラブルとできることを目指しており、同一レイアウト設計データを両方で製造できることを目指している。なおこのフェニテック社のシャトルサービスは、規格上はゲート長 0.6[μm]

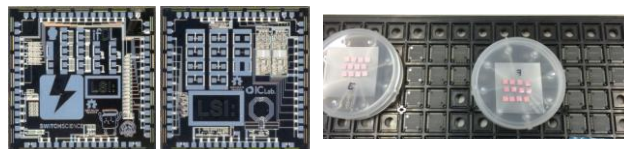


図6 MakeLSI:の有志で2015年に試作したチップ

までの設計が可能であるが、その設計ルールの開示のためにはNDAが必要である。このNDA締結によって、性能を最大限生かす設計は可能であるが、それに必要なNDA締結による敷居の高さを避けるため、あえて設計ルールぎりぎりの設計を行わない(しかし設計ルールは満たしている)汎用の設計ルールを用いることとしている。

いずれも、ほぼゼロからのスタートであり、ないものばかりの状況であるが、徐々に知見と設計データ、経験の蓄積が進んでいる。

4.5 ミニマルファブ

集積回路が真の道具になるための課題である、設計ツールと製造方法の解決に関しては、原らによる minimal プロジェクト⁽²⁷⁾がある。これは、0.5インチの超小型ウエハに対して、マスクが不要な投影型露光と工程ごとに独立したクリーン度の高い微小な部屋(局所クリーン化)、およびそれらの間でウエハを移送する小型ケースの組合せによって集積回路を製造する装置の開発を進めるものであり、まさに小ロット数で多品種な集積回路の製造を可能とするものである。またこのプロジェクトでは、ある程度の集積回路およびMEMS構造を設計するための使い勝手のよいCADツール群の開発も行っている。

現状では、1[μm]程度の加工寸法で、当初から pMOSFET を、さらに最近では nMOSFET も製造可能な段階になり、品質の向上と安定化、および周辺技術・装置の開発が急ピッチで進められている。このミニマルファブは、原理的に大量生産には向かないため、現在ある大規模な半導体製造工場(メガファブと呼ぶ)と競合するものではない。ミニマルファブは、あくまでも小ロット数で多品種(プロセスパラメータのカスタムやMEMS製造プロセスも含む)の集積回路の製造方法であり、そのターゲットはメガファブでつくる、先端の微細加工での大量生産の集積回路とは本質的に異なる。しかしミニマルファブのターゲットの集積回路が高付加価値であるのみならず、集積回路の民主化を実現し、集積回路が真の道具となるための極めて有用な手段であることは間違いない。

ミニマルファブによって集積回路が真の道具になっていく現実の過程は、プリント基板が歩んできた過程に学ぶところが多いと思われる。プリント基板は、かつてはマスク起こしのためのインシヤルコストが高価であり、とてもアマチュアが「遊び」でつくることのできるものではなかった。しかし(株)インフローのオンラインのプリント基板製造サービス P 板.com⁽²⁸⁾のような、相乗りなどによってインシヤルコストを抑え、また設計ツールや設計方法のノウハウ

などの共有・相互啓発と連動したプリント基板製造サービスが登場し、状況は一変した。前述の MAKERS ムーブメントを支えるフィジカル・コンピューティングにおいても、このような「プリント基板の民主化」はその強力な裏付けとなっている。実際、minimal プロジェクトでも、ミニマルストアと呼ぶ枠組みの構築が進んでいる。

周辺環境の整備や普及のプロセスも含めて、ミニマルファブの今後の動向に注目したい。

5.おわりに

本稿では、「技術の民主化」によって技術が本当の意味で道具となることの意義とその実例をふまえ、集積回路や電子回路技術が真の道具となるための課題とその解決のための方策について、実例を交えて紹介し、考察した。

本来は「求める人にとっての具現化の道具」であるべき集積回路が、高度に進化した故に、「求める人」から乖離しつつある現状を鑑み、本来の「道具」となることで、イノベーションの基盤技術となることを願う。

文 献

- (1) R.H.Dennard et al.: "Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions", IEEE Journal of Solid-State Circuit, Vol.9, No.5, pp.256-268 (1974)
- (2) 直野: "転換期の半導体・液晶産業", 日経 BP 出版 (1996)
- (3) 三木・宇都宮: "マイクロモノづくりはじめよう", テン・ブックス (2013)
- (4) 秋田: "「部品」としてのマイコン・半導体", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.37, No.29, pp.51-56 (2013)
- (5) N.Gershenfeld: "Fab-パーソナルコンピュータからパーソナルファブリケーションへ", オライリージャパン(2012)
- (6) C.アンダーソン: "ロングテール", 早川書房 (2009)
- (7) P.F.ドラッカー: "現代の経営[上]", ダイアモンド社, pp.130-149 (2006)
- (8) C.アンダーソン: "MAKERS-21世紀の産業革命が始まる", NHK 出版 (2012)
- (9) 野尻: "南極点のピアピア動画", 早川書房 (2012)
- (10) "ハードウェア起業の時代", 日経エレクトロニクス 2012年 11月 26日号 (2012)
- (11) M.Hatch: "Maker ムーブメント宣言一草の根からイノベーションを生む 9つのルール", オライリージャパン (2014)
- (12) 小川: "ユーザーイノベーション", 東洋経済新報社 (2013)
- (13) L.Fleming: "Perfecting Cross-Pollination", Harvard Business Review, Vol.82, No.9, pp.22-24 (2004)
- (14) 西餅: "ハルロック(1)(2)(3)(4)", 講談社 (2014)
- (15) 宮下: "コンテンツは民主化をめざす一表現のためのメディア技術", 明治大学出版会 (2015)
- (16) 小林: "フィジカルコンピューティング概論", 情報処理, Vol.52, No.8, pp.914-917 (2011)
- (17) <http://arduino.cc/>
- (18) 秋田: "ユーザ参加型センシングシステムの可能性", 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム予稿集, 6AM2-E-2 (2013)
- (19) <http://www.vdec.u-tokyo.ac.jp/>
- (20) <http://www.viscuit.com/column01/column03/>
- (21) 秋田: "LED点滅用のLSIをつくってLチカをやってみた" <https://www.youtube.com/watch?v=A188CYfuKQ0>
- (22) 秋田: "懲りずに再度、LED点滅用のLSIをつくってLチカをやってみた" <https://www.youtube.com/watch?v=NN1wNf66vXw>
- (23) <http://www.arm.com/ja/products/processors/designstart-processors-ip/>

- (24) 秋田: "また懲りずに再度、LED点滅用のLSIをつくってLチカをやってみた" <https://www.youtube.com/watch?v=4ZE9st9IJRo>
- (25) http://ifdl.jp/make_lsi/
- (26) <https://www.mosis.com/files/scmos/scmos.pdf>
- (27) <http://www.minimalfab.com/>
- (28) <http://www.p-ban.com/>

*本チップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通じ、ローム(株)、凸版印刷(株)、シノプシス(株)および日本ケイデンス(株)の協力で行われたものである。