



In Laboratory Now

研究室訪問 1

配線に見る集積回路の可能性

杉浦 修 研究室～電子物理工学専攻



杉浦 修 助教授

トランジスタ 配線しなけりゃ ただの石

これは集積回路の研究に携わる杉浦先生の言葉であり、先生の研究内容を端的に表している。

集積回路の高性能化には様々な問題があり、数多くの研究者が研究をしてきた。ところが、今まではトランジスタ自体の微細化ばかりが注目され、それらを繋ぐ配線の研究は疎かになっていたのである。杉浦先生はこの配線分野にこそ集積回路の誕生と同程度の革命的な発展の鍵があると考え、配線の研究に動しんでいる。そこで今回は先生がいかにして難題に挑んでいるのかを伺った。



配線素材の切り替え

集積回路とは一つのチップ上にトランジスタ、ダイオード、抵抗、コンデンサーといった素子を載せた電子部品である。演算やデータの蓄積を行い、情報化社会の中核をなす。1960年代に一チップあたりに10～100素子というところから始まったこの集積回路は、今では数百万以上もの素子を載せ、その性能は飛躍的に向上している。

集積回路の性能向上として、具体的には消費電力の低下や情報処理の高速化等が挙げられる。殊に性能向上という面で注視されているこの高速化は、電気信号の切り替え速度を上げることで実現される。しかしそこには大きな障害がある。

集積回路の情報処理、信号認識は電圧の高低差を用いて行われる。そのため、電圧の上昇や降下の所要時間が信号の遅延に直に影響し、処理速度を下げ、信号の誤認を引き起こすのだ。

この信号の遅延には、主に二種類ある。トランジスタなどの素子に由来するものと、配線に由来するものだ。

トランジスタに由来する遅延においては、トランジスタ内部の電子の移動距離が遅延の要因となっている。以前はトランジスタ自体が大きく、電

子の移動距離が長かったために信号の伝達が遅れ、動作速度が遅かったのである。この問題に対処すべく、電子の移動距離の短縮を目的とした微細化・高集積化が精力的に研究され、その結果トランジスタは縮小し、性能は著しく向上した。このトランジスタの微細化と同時に集積回路本体の微細化・高集積化も著しく進んできたのである。

反面で、高集積化に伴い配線遅延の問題が表面化してきた。集積回路の微細化による配線幅の縮小から、電気抵抗が上昇したためである。配線による遅延は配線の電気抵抗に比例するのである。

この対策として、配線をアルミより電気抵抗の小さい素材に替える動きがあった。そこで、アルミの代替となる素材として銀に次ぐ抵抗率の低さを持ち、経済性にも優れているという点で銅が選ばれた。また銅は抵抗以外の面でもアルミより優れている。アルミ配線の場合、アルミ原子に高密度の電子が衝突することによりその原子が移動することがある。それに対して原子量の大きな銅では原子移動が起こりにくい。このような利点から、現在銅が配線の材料として使われている。

一方で、アルミが近年まで主流をなしていたこ

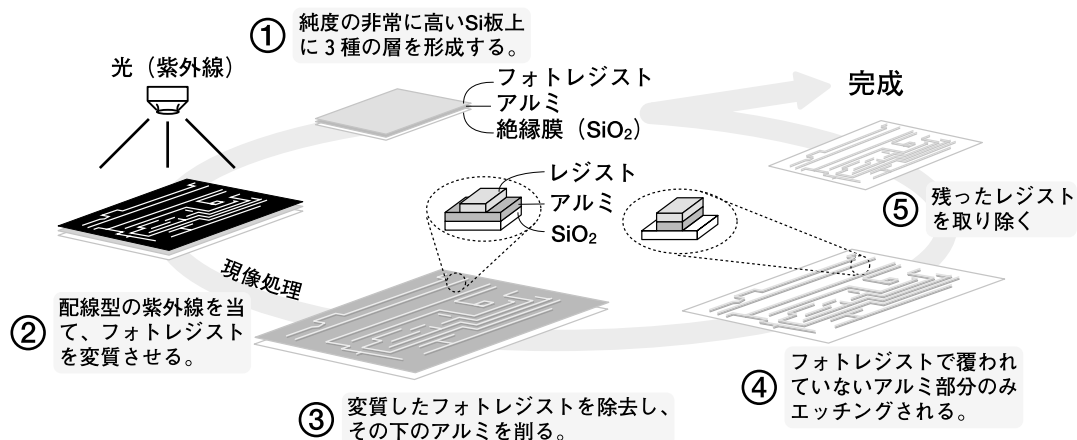


図1 一般的なアルミ配線による集積回路製造工程

ともにも理由がある。それは微細加工技術が確立され、回路製造工程が比較的容易であったからだ。アルミ配線の場合は図1のような工程であり、この方法は工業化を可能にした。

さらに優れた点として、アルミは表面が酸化して Al_2O_3 の不動態を形成し、安定な構造をとることが挙げられる。ほとんどの金属は安定せずにイオンを発生させ、配線を包む絶縁膜の中に拡散し、絶縁破壊・ショートを引き起こしてしまう。

これは銅でも起こる現象だ。

しかし配線の遅延問題が差し迫った状況にあるために、このようなアルミの優れた点を諦めてでも銅配線が採用されるようになった。そこで杉浦先生は、銅配線への移行によって生じた難題の克服を研究課題とし、現行の技術の補完と新たな集積回路製造工程の研究を行っている。

まずは現行の配線製造工程で生じた問題への取り組みを紹介する。



安定した銅配線製造工程の確立

銅はアルミで確立された微細加工技術が困難なため図1のような工程での作製が非常に難しい。そこでダマシン法と呼ばれる配線形成法が用いられる(図2)。

これは絶縁膜に配線パターンをあらかじめ掘り、その上に溝が充分埋まるだけ厚く銅を堆積させる。そして銅を表面から平らに研磨して、ちょうど最初に掘った溝だけに銅が残るように削れば、銅配線ができあがる。

これが銅配線の集積回路を製造する際に、現在一般的に用いられているダマシン法である。ところが、この研磨が容易ではない。

銅の研磨にはCMP法という、化学的研磨作用と機械的研磨作用の両方を同時に行う方法が使われている。つまり、スラリーという薬液で、銅を化学的に溶かしつつ、同時に研磨パッドと砥粒を

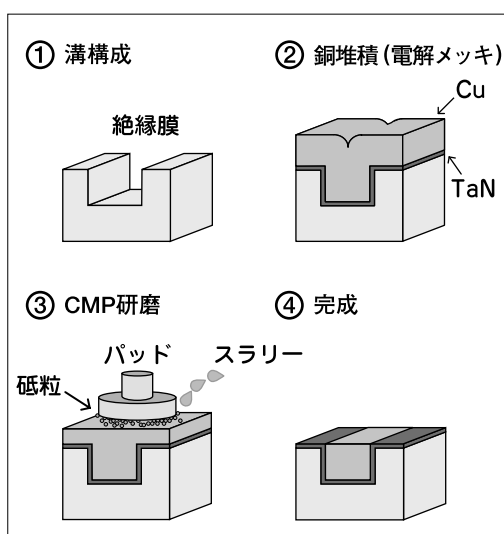


図2 ダマシン法

用いて物理的に削っていくのである。スラリーというのは、酸化剤である H_2O_2 をもとに複数の薬品を混合したもので、銅を溶かす作用がある。しかし同時に、銅表面を平坦に研磨するため、銅が酸化されるのを防ぐBTA溶液という防食液も混ぜられている。この工夫は勘と経験によってなされたものだ。このBTAは銅と反応して保護膜を形成する。それにより、酸化剤による過剰な侵食を防止し、さらに堆積時に生じた凹凸にBTAが上手く作用して平坦形成に貢献すると予測されている。しかし実際に研磨中に何が起きているのか、科学的な裏付けがとれているわけではない。



BTA による銅表面の保護

銅配線に切り替える際の難点として、さらに銅イオンの拡散現象があった。そこで必要となるのがイオンを発生させない保護膜である。通常は保護膜として、緻密な構造を形成する窒化チタンや窒化タンタル、窒化シリコンの膜を使っている。これらを絶縁膜上に堆積させ、その上に銅配線を行い、再び保護膜としてこれらを堆積させ、銅を完全に包み込むことで拡散を防ぐ。

しかし単に隙間なく包み込めばよいわけではない。ここで重要なのは保護膜の厚さである。保護膜が厚いと、肝心の銅配線の断面を小さくしてしまい、抵抗が上昇してしまうのである。これでは銅配線に切り替える意味が損なわれてしまう。

そこで、この問題の解決に、先ほど紹介した防食剤のBTAが使えると杉浦先生は考えている。BTAの保護膜は、窒化物よりも遥かに薄く形成でき、BTA溶液に基板を浸すだけで銅表面に安定な膜を形成するので、容易に製造できる。そこで杉浦先生は、BTA膜を銅配線の表面に形成すれば、既存の保護膜の代わりに使えと考え、BTAの実用化を目指している。

実用化に向けた第一歩として、杉浦研究室ではBTA膜の有効性を示す実験を行っている。それはBTA膜による銅イオンの拡散防止効果の測定である。

電圧を一方に掛けるとイオンは電界方向に動くという性質がある。杉浦先生はこれを利用して実際に銅イオンに電圧をかけた場合、イオンがポリイミド（絶縁膜）中をどの程度移動するのか、

そこで、杉浦先生は博士課程の学生と共にCMP研磨の科学をその原理から明らかにしようと試みている。研磨中にはどのような膜が銅表面に生じているのか、そしていかにして銅がスラリーに溶けるのか、さらにはその膜がどのような条件下で除去されているのか。その詳細を研究しているのである。

集積回路発展に伴い、研磨に対する厳しい要求が生じている。勘や経験だけでなく研磨技術を科学的に解明することこそ、この要求に答えられると考えられる。そこで杉浦研究室では研磨の科学を解明する研究がなされている。

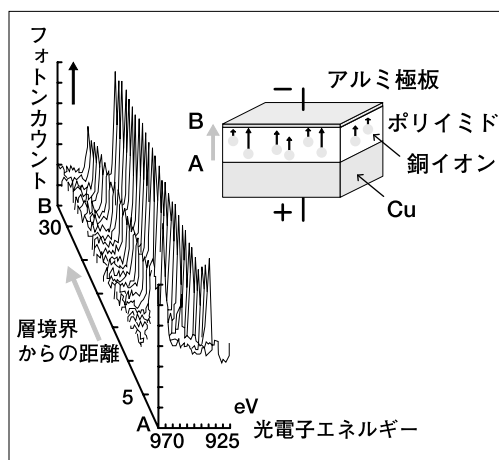


図3 A 銅イオンの拡散 (BTAなし)

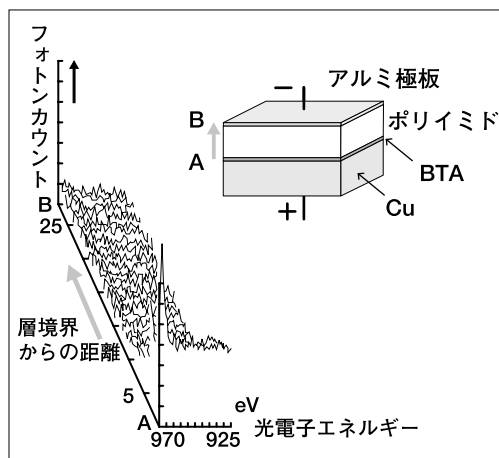


図3 B 銅イオンの拡散 (BTAあり)

XPS（*注）を用いて測定した。BTAを使用していない場合と使用した場合で測定し、その結果がそれぞれ図3 Aと図3 Bである。

実験装置として、Cu層とポリイミド層を重ね、Cu側を正極、ポリイミドをはさんだ対向電極のAl側を負極として電圧を掛ける。グラフの横軸は観測された光電子エネルギーを、縦軸は検出器に到達した光電子の入射頻度（フォトンカウント）を表し、このフォトンカウントが銅イオンの量を

表している。そして奥方向の軸は層の境界からの距離を示している。図3 Aで、BTAで保護していない方は銅イオンが拡散しているのに対して、図3 Bではほとんど拡散が確認されていない。この事実はBTAの保護膜としての有効性を示している。

これから様々な条件のもとで実験を重ね、BTA膜の特性を調へ上げていくことで、BTA膜を用いた集積回路の実用化が期待される。



新たな配線法への取り組み

ここからは杉浦研究室で行われている、将来的な応用も見据えた新しい銅配線技術を紹介する。

集積回路の面積の有効利用と素子間の配線長の減少のために、これからは配線を多層化する必要がある。しかし、既存の方法による多層化は、製造工程において技術的に困難な点を抱えている。

特に多層化を行う際に、各層の表面を平坦に構成することは上の層の形成において重要である。

しかし、先のダマシン法では、研磨の際削りすぎや削り残しが起こりやすく、平坦な表面の作製は困難である。そこで、研磨などの複雑な工程を省き、できるだけ簡単な工程で多層化を行える配線法が望まれている。

そこで杉浦先生は独自の新しい配線法でこの困難に挑もうとしている。杉浦先生の考案した多層配線の特徴はポリイミドの使用と無電解メッキ法にある。

これによる多層配線は図4の手順で行われる。まずポリイミドの表面に金粒子を配置する。このときに個々の粒子が接触しないようにする。続いて金を覆うようにポリイミドを敷き、配線パターンを転写し、現像液につけて余分なポリイミドを取り除く。するとポリイミドを取り除いた部分に金粒子が露出する。そして取り除いてない部分ではポリイミドに覆われたままとなる。これをメッキ液に浸すと金粒子を触媒として銅が堆積し、配線ができる。後は再びポリイミドを敷き、これらの工程を繰り返すことで多層配線が可能となる。

この方法ではメッキ時間を制御することで正確な厚さに銅を堆積でき、また電解メッキのような研磨の必要がない。これは画期的な技術だ。

ところが、この方法にも問題がある。電解メッキで用いるメッキ液は酸性でも使用できるのに対して、無電解メッキ用の主流なメッキ液では、銅

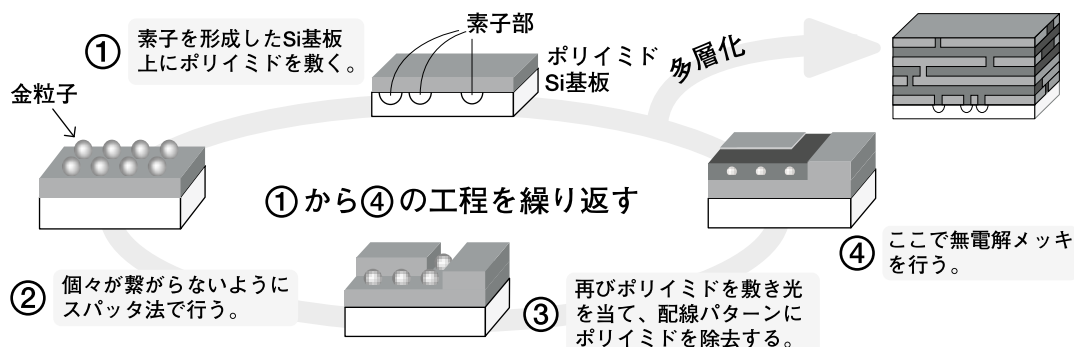


図4 ポリイミド無電解メッキによる多層配線法

*注 原子に電子を衝突させ、その時発生される元素特有のX線の波長によりどこにどの原子が存在するかを測定するもの。

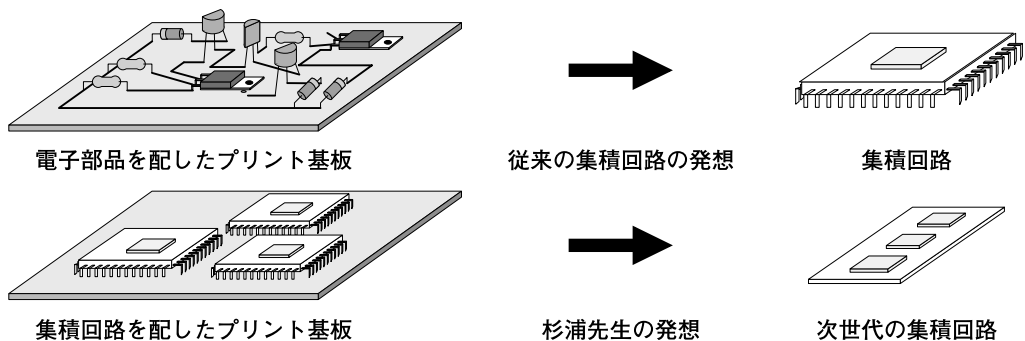


図5 新たな配線法の展望

の水酸化物が沈殿してしまうため、メッキ液はpHが高くなければならない。しかしこの条件下だと、Siや変質していないフォトリソも溶けてしまう。中性での無電解メッキ法もあるものの、臭化カリウム等のアルカリ金属を使用しているため、トランジスタの特性を変えてしまう。これらの理由から無電解メッキ法が集積回路分野で用いられることがなかった。

杉浦先生は学生と共にこれを克服すべく実験を重ね、pH7でアルカリ金属を含まないメッキ液を作ることに成功した。これにより無電解による銅配線形成が行えるようになった。現段階では、この液が空気中の酸素により酸化され易く、使う度に取り替えなければならないという難点がある。また現在このメッキ液で配線を行った場合、断面の太い配線では上手くいくが、細い配線では銅粒子間に隙間が空くために抵抗が高くなる。杉浦研究室では試行錯誤を続け、メッキ液の問題点を克服し、配線の抵抗が常に期待通りになるよう改良する段階にまで至っている。

ところで、杉浦先生は集積回路の配線技術の発展として進めてきたこの配線法を、新たに集積回路を包括するプリント基板部の配線にも応用しよ

うと考えている(図5)。

集積回路が生まれる前は、銅配線パターンをプリントした基板にトランジスタ、ダイオード、抵抗、コンデンサ等載せ、半田付けをして回路を作っていた。このプリント基板上での回路を、1つのSiチップ上に作り上げてしまおうというのが従来の集積回路の発想である。この発想により生まれた集積回路は、微細加工技術の進展により今日の集積度、性能にまで発達した。

現在複数の集積回路がプリント基板上に配線されている。このプリント基板上の集積回路をポリイミド上に新たな配線法で一括形成することで、集積回路の発想と同程度の可能性を秘めた次世代の集積回路ができると杉浦先生は考えている。

トランジスタ等の素子の集積化が今日の集積回路にまで進展したように、これからは集積回路の高集積化によって新たな発展が起こるであろう。そのためには配線技術は重要なのだというのが杉浦先生の信念だ。

このように杉浦研究室では、現在実用化されている技術でも、より効率的で完成度の高いものを目指している。それだけにとどまらず、新たな発想を生み、実現すべく日夜研究を行っている。

この記事を書くにあたって私自身配線分野というものに対してしっかりとしたイメージが持てていませんでした。しかし、今回の取材により理解と興味を深めることができました。読者の皆様にもこの記事を通して少しでも集積回路における配線の重要性を感じ、配線分野に興味を抱いて頂け

ましたら幸いです。

今回杉浦先生には度重なる取材に応じて頂きました。また先生には詳細なチェック及び沢山の代案を賜り、完成に至ることができました。最後になりましたが、心より御礼申し上げます。

(三浦 弘道)