

半導体の歴史

— その13 20世紀後半 集積回路への発展(8) —



ルネサスエレクトロニクス株式会社
生産本部 デバイス・解析技術統括部
MCU デバイス開発部 主管技師

おくやま こうすけ
奥山 幸祐

シリコン表面安定化技術から制御技術へ —イオン注入技術

■ MOSFET とイオン注入技術

1960年代前半までのトランジスタ製造工程のクリーン化や保護膜技術の進歩はシリコン表面で可動イオンとして働く Na^+ 汚染の影響を激減させるとともに、前稿のシリコン結晶方位の $\langle 100 \rangle$ 化などによりシリコン表面の安定化が図られることで MOS 電界効果型トランジスタ (MOSFET) が製品化されてゆく。しかしながら、これらの技術のみでは MOSFET の特性を完全に制御することはできず、性能の良いトランジスタを得ることはできない。ここで登場してくるのがイオン注入技術である。シリコンの固体に向け不純物イオンを高電界で加速し衝突させることで、シリコンの固体の中に注入する手法である。このイオン注入技術により、シリコン表面の不純物濃度を自由に制御できるようになる。このシリコン表面の不純物制御技術は、本格的に MOSFET が産業界にデビューするための画竜点睛となる。その後に出てくる新技術は MOSFET の基本構成に不可欠な技術と言うよりは、高集積化を可能にするための必要手段と言える。イオン注入は当初、バイポーラトランジスタのベース領域の不純物ドーピングへ適用が検討されるが、熱拡散やエピタキシャル成長中の不純物ドーピングに取って代わるまでに至らない。ドーピングの精度という点だけからみても、当時の拡散法に比べ格段に優れた技術であったが、装置が大掛かりで半導体技術者にはなかなか馴染まず、製造現場のプロセス技術として認知されない。しかし、1960年代半ばでの MOSFET との出会いが本格的な技術として育て上げられるきっかけとなる。MOSFET では更に極微少の不純物量を制御する技術が必須である。1964年頃までに表面安定化技術により MOSFET が産声を上げる頃合に時を合わせたように、1965年頃から

欧米や日本における企業や大学でイオン注入の研究が活発になり、1970年代前半までに基本技術が確立されてゆく。イオン注入技術は、不純物のイオンビームを作り、数10ないし100キロボルト以上の電圧で加速したビームでウェーハ面を走査する「不純物注入プロセス」と、イオンビーム照射によってウェーハ中に発生した結晶損傷を回復させるための「アニールプロセス」に分けることができる。これらの技術がほぼ固まり、イオン注入がシリコンデバイス製造の基幹技術となるのが1970年代前半である。これによって1970年代から始まる MOSFET を使用した IC、LSI の時代が開花してゆく。特に、この技術研究を主導してゆくのが日本の企業や大学であり、当時の新技術開発事業団が積極的にこれらを先導している。この技術を逸早く確立することにより、日本の半導体プロセスがアメリカ追随型から脱却するための1つの大きなきっかけとなり、1970年代から1980年代にかけての日本での半導体産業隆盛の足がかりとなる。

■ イオン注入による MOSFET 特性制御

1960年代に製品化された MOSFET は P 型 MOSFET (PMOS) である。クリーン化技術が完全でない時期には Na イオン汚染を抑制しきれず、シリコン表面に N 型反転層が頻繁に発生する。N 型のドレインとソースを持つ N 型 MOSFET (NMOS) ではドレインとソース間のチャネル部に N 型の反転層が形成されると電気的に導通してしまい、リーク (漏れ) 電流が大きくなり使用できなかったのである。PMOS では P 型のドレイン、ソースであるために N 型の反転層ができてドレインとソース間のリーク電流が増えることはない。表面安定化技術の進歩で Na^+ イオンの影響が無くなってくると次第に NMOS の製品化が検討されてくる。NMOS のチャネル電流の元になるキャリアは電子であり、シリコンでは PMOS の正孔に比べて2倍程度移動度が大きく駆動能力が大きいためである。

図1に MOSFET の特性として、チャネル電流のゲート電圧依存性を示す。チャネル電流はゲート電圧の印加でシリコン表面に誘起されたキャリア (電子や正孔) により形成された反転層を介してドレインからソースに流れる。チャネル電流が流れ出す時のゲート電圧をしきい値電圧 (V_{th}) と呼び、どれだけのゲート電圧を印加するとチャネル電流が流れ始めるか、いわゆる V_{th} が幾らになるかはゲート電

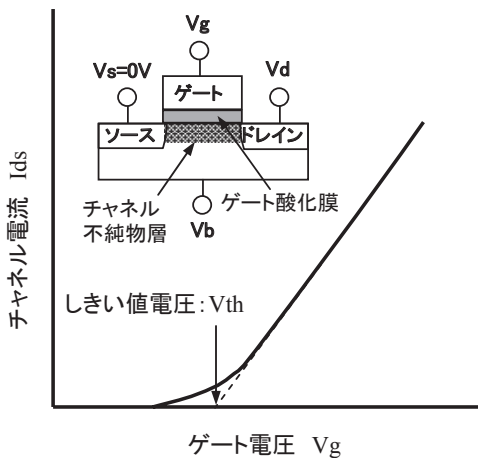


図1 MOSFET の特性

極とシリコンの間の酸化膜厚とシリコン表面の不純物濃度によって決まる。酸化膜は高温下で酸素雰囲気さらし酸素をシリコン中に熱拡散することで形成し、酸化膜厚は温度と酸素雰囲気中の酸素濃度で決められる。一方、シリコン表面への不純物層の形成は、当時であれば高温下で不純物を含む雰囲気さらしすることで不純物を熱拡散させてドーピングする。しかしながら、必要とされる不純物濃度は1平方センチ当たり10の10～11乗イオンの極微量であり、熱拡散で制御できる量ではない。このため、1960年代の後半は V_{th} の制御をどのようにするかが大きな課題となり、イオン注入技術の研究が本格的になってくる。

今日でも用いられている、しきい値電圧制御の為のイオン注入プロセス概略を図2に示す。予め、表面に薄い酸化膜を形成したウェーハ上にホトレジストによるパターンニングを行い、イオンを注入する部分としない部分を分け、しない部分をレジストで覆っておく。ウェーハをイオン注入装置に装着し、注入する不純物原子をイオン化して、数10キロボルトの電圧下の静電界によってウェーハ面に加速する。この時の不純物イオンはボロン（硼素） B^+ 、フッ化ボロン BF_2^+ などが用いられる。レジストのない部分のウェーハ表面にイオン化した原子は高い運動エネルギーを持って試料面に衝突し、内部まで入り込む。イオンが深く入り過ぎないように、この注入は、表面に設けた薄い酸化膜を介して行われる。ウェーハ表面の酸化膜を透過しての不純物制御技術は、イオン注入法だけに許される技術である。その後、900℃から1000℃程度の高温化でアニールすることでウェーハ表面に注入された原子が活性化するとともに、イオン原子の衝突で受けた結晶の損傷も回復し、極浅いウェーハ表面に不純物層が形成される。注入された不純物が表面から浅い部分だけに止まれば、この不純物がすべて SiO_2/Si 界

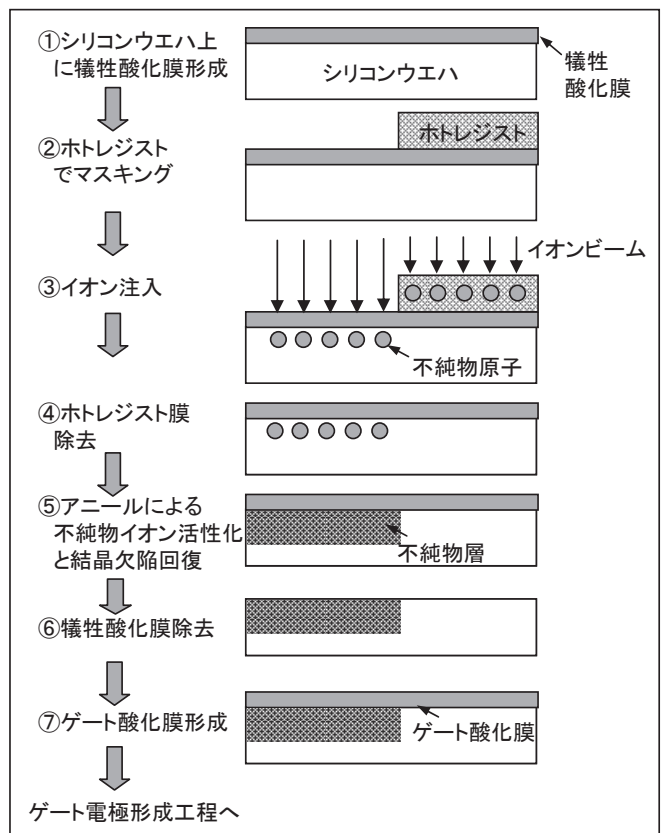


図2 しきい値電圧制御の為のイオン注入プロセス概略

面にあるという近似を採用できる。これらのアクセプターはイオン化するので、界面に余分の電荷層（この場合は負電荷）が形成されたことになる。この近似の下で、注入された不純物による V_{th} の変化が、 $\Delta V_{th} = -Q_{ii}/C_{ox} = +qN_{ii}/C_{ox}$ で与えられる。 Q_{ii} は注入された不純物による単位面積あたりの電荷、 N_{ii} は注入された原子の単位面積あたりの数である。この場合、加えられた電荷が負なので、しきい値電圧 V_{th} の変化は正となる。

Ⅲ イオン注入技術のあゆみ

イオン注入を半導体への不純物ドーピング技術として最初に考案したのは、1950年にベル研究所のラッセル・オールら、バデュー大学のラク・ホロビッツら、および東北大学の西澤潤一らであり、それぞれイオン注入の原型について特許出願している。オールは『半導体のはなし 第5回』で登場した人物で



ラッセル・オール

あり、1941年にpn接合を発見し、pn接合に光を当てると接合間の電位が発生する光電効果を合わせて発見した人物である。その後のベル研究所でのトランジスター発明は、このオールの発見を目にしたマービン・J・ケリーが半導体という個体に新しい可能性があることを確信し、ショックレーやバーディン、ブラッティンなどを集めて研究を開始させたことで得られた成果である。1952年にオールは同僚のW.J. ピーテンボールと共に『イオン衝撃を受けたシリコンの特質』を発表しており、1950年に特許出願した後、直ぐにイオン注入の実験に取り掛かったことが窺える。この報告が、実際にシリコンへのイオン注入を行った最初の報告となる。

また、西澤はトランジスター発明が日本に伝えられた1948年に東北大学工学部電気工学科を卒業した翌年に、前年から電気試験所の鳩山道夫物理部長を中心に始めていたトランジスター研究のグループに入り、トランジスターのコレクタ耐圧向上を担当して1年後の1950年にイオン注入を出願したものである。耐圧向上の構造としてpn接合の間に不純物濃度の低い層を設けたPINダイオードを考案し、その構造の製法の一手法としてイオン注入を出願している。西澤は、その後、静電誘導トランジスター、半導体レーザ、光ファイバー、光ダイオードなどの幅広い半導体分野で研究成果を出すとともに、多くの研究者を育て上げ、世界における半導体の第一人者となってゆく。

.....



西沢潤一

.....

日本で最初に半導体にイオン注入を試みたのは伊藤糾次である。伊藤は1950年に早稲田大学大学院理工学研究科文部省特別研究生を修了し、上記のオールらの『イオン衝撃を受けたシリコンの特質』を1952年の春に読み、これなら大学で実験できると考えて、ただちに追試のための実験の準備を開始している。暑い夏の中、秋葉原のジャンク屋を回り、米軍の放出品の中から高圧整流器管や絶縁ガイシなどを買い集め、秋の終わりには、イオン照射装置を組上げている。実際に実験を始めようとした時、試料と放電ガスを手に入れることに困るが、ネオンサインの仕事を始めた知り合いから放電ガスとしてネオンガスとアルゴンガスを分けて貰い、試料は日本電気の好意で手に入れたマイ

.....



伊藤糾次

.....

クロ波用シリコンダイオードの不良品を分解してシリコンペレット部分を使用するなどの努力で実験を着手している。実験の結果は、殆ど整流特性を示さなかった試料が整流特性を示すようになったが、オールらが示した理想的な整流特性が得られず、伊藤自信はシリコンの表面を衝撃しているイオンの正体を知ることが重要と考え、その後、表面処理に使うガスの成分を知るための質量分析計を作る方向に興味を傾いてゆく。原始的な実験ではあったが、この実験が国内の初めてのイオン注入実験となる。伊藤は11年後の1963年以降、本格的にイオン注入の研究に邁進することになる。

1954年になるとジェネラル・エレクトロニクス社 (GE) のモイヤー、ベル研究所のショックレーがそれぞれ今日のイオン注入技術そのものと言ってよい内容の出願をしている。特に、ショックレーの出願はステンシルマスクと縮小イオン光学系によって微小パターンをウェーハ上に得る方法や分子イオン、多価イオンの注入なども記載されている。この手法は現在、半導体製法の基幹技術である、ホトレジストをマスクとして微小パターンにイオン注入をおこなっているプロセスそのものであり、ショックレーの技術に対する先見性の確かさが窺われる。

その後、1963年頃までの大凡10年間、イオン打ち込み技術に関する論文も年間に数件で大きな進展は見られず、休眠状態となる。本格的に研究が立ち上がってくるのは1965年から1966年辺りであり、その頃から論文が大幅に増えてくる。この10年間は、「そんなに大きなイオンが結晶の中に入るはずがない」、「イオンが結晶に入ったとしても結晶に与える衝撃による結晶欠陥が多く、使用できる代物ではない」、「そうまでしなくとも熱拡散やエピタキシャル成長時の不純物ドーピングで充分」と言った常識がイオン注入技術の進展遅らせたと考えられる。この間、MOSFET技術として表面の安定化技術を確立させてゆく過程であり、極微小の不純物ドーピングが未だ必要とされていないこともイオン注入技術が進展していない原因と考えられる。必要性のないところに急激な技術進展は生まれないとも言える。一方、この10年間はアメリカにおける「電子ビーム技術シンポジウム」などを中心に電子ビームやイオンビームを用いたドライプロセスの基盤が形成されてくる時期でもある。イオン加速装置も各国で研究が続けられ、装置技術が半導体への粒子線照射を本格的にできるレベルまで完成してくる。

伊藤糾次は1963年にイオン注入の研究を再開し、1966年のそれまでの研究成果として応用物理学会講演で、アルミニウムをイオン注入したシリコンの特性について、イオン注入に関する第一報として発表している。これらの実験に用いたイオン注入装置は、不純物イオン源、加速管およびターゲットフォルダーを絶縁体を介して一体として組み上

げ、大型の真空ベルジャーの中にセットすると言う原始的なものである。ビームの偏向器、質量フィルタもなく、20キロボルト程度の加速電圧で実験を行っている。この程度のエネルギーでも、シリコンにイオン注入されたアルミニウムがアニール中に増速拡散することを見だし、この結果は1968年10月の『JAP (アメリカ応用物理学会)』誌に掲載される。

1964年には、先に触れた日立中央研究所でLTP 保護膜技術を開発した徳山巍が半導体へのイオン注入実験を開始する。それまで、日立中央研究所において神原豊三の発案で、コッククロフト (イギリスの物理学者、直流高電圧を発生する装置を作り、リチウムを用いて原子核の人工的変換に初めて成功) 型の加速器を研究していた槌本尚のグループと一緒に実験を開始している。



難波進

.....
続いて、1965年に理化学研究所の難波進が、ペンシルバニア州立大学で開催された第七回電子ビームシンポジウムにおいて、D. B. ミドベットの『イオン・インプラントーション・オブ・セミコンダクタズ』の講演に強い衝撃を受け、帰国後にすぐにイオン蒸着装置のイオン注入装置への改造と、イオン注入実験の準備にかかる。難波は伊藤糾次とは近所に住み、時折往き来して飲みあう仲である。

Ⅲ 新技術開発事業団主導の研究開発の組織化

これらの研究者を纏めて、研究開発を本格スタートさせたのが新技術開発事業団の千葉玄弥である。千葉は、イオン注入が今後の半導体技術の1つとなることを予測し、理研(難波)―日立、早大(伊藤)―東芝の2グループにそれぞれ約3億円(期間3年間)の開発委託を出し、研究開発を1968年にスタートさせる。この計画は、事業団の枠を超えるのではないかと言うことで、国会でも追及されたが、結果的には千葉らの熱意で認可されている。この事業団の動きに刺激され、翌年から通産省の大型補助金が関西5社に下り、電機メーカーではいっせいに本格的な研究開発がスタートする。千葉はイオン注入技術の前にも電子ビーム露光の国産化を後押ししようとしたが、この当時、半導体業界は光リソグラフィを中心としたアメリカ技術の導入に熱心であり、電子ビーム露光によるICプロセスに関心をもつ会社は殆どなく断念している。千葉は1960年代に欧米で活発に研究されだした電子やイオンのビーム技術が将来の半導体産業を支える中心技術になると見通し、国の予算をここにつぎ込むことで大きな産業発展を期待できると考え

たのである。お金には「生き金」と「死に金」とがあると云われるが、千葉らの開発委託金は、その後の日本における半導体産業発展の引き金になったとすると、双方合わせて6億円程度の開発委託金は途轍もない「生き金」と考えられる。2010年現在、事業仕分けなるものが政府主導で行われているが、単なる「無駄」の排除で「死に金」を減らすことだけでなく、技術立国として将来を切り開くために国家予算を向け、「生き金」になる使い道を期待したい。官僚を排除するだけではなく、千葉の様な官僚を育成してゆくことも合わせて重要なことではないだろうか。

Ⅳ 大学における研究

.....
当時、欧米ではイオン注入はまだ探索研究の段階であり、日本における政府主導プロジェクトの開始を見て、大いに刺激を受け、欧米における半導体研究開発の組織化の必要性が提案されてくる。1969年の秋デトロイトで開かれたECS 国際会議で伊藤はアメリカの研究者らと会い、「半導体へのイオン注入」の研究を推進するため国際会議を開催する相談を行う。伊藤はこの場で新技術開発事業団の開発委託で始めたイオン注入技術の研究開発プロジェクトを紹介する。この話はアメリカ側に大きな影響を与え、その後、アメリカでも政府機関への研究推進の働きかけが行われるとともに、日本における研究開発の成果に大きな関心を持つようになる。また、イギリスのサイエンス・リサーチ・カウンシルのリコメンデーションの中にも日本の計画について触れ、研究開発の早期組織化が提案されている。

伊藤らはこの研究プロジェクトで研究室に加速エネルギー60キロ電子ボルトの本格的なイオン注入装置が出来上がる。このため、シリコン以外にもガリウムヒ素への不純物イオン注入などに研究の幅を広げ、色々な研究成果をだしてゆく。伊藤らはイオン注入技術プロジェクトを推進するに当たって用いたキーワードは「ドライメソッド」と「低温プロセス」という言葉である。半導体製造による環境汚染を防止する意味を含んでいる。

イオン注入は普通室温で行うので、イオン注入された領域の結晶は強い損傷を受ける。しかし、アニールを加えると比較的低温でも、基板との界面から急速に再結晶化が起こり、元の結晶状態を回復する。これは固相エピタキシャル成長と呼ばれている。この現象を解析して行く過程で、低温で結晶成長できる手法として注入エピタキシャル技術を編み出している。これはシリコンの分子線エピタキシャル装置の中でシリコンの一部をイオン化し、中世のシリコン原子に比較的低エネルギーに加速したシリコンイオンを混ぜてエピタキシャル成長を行う方法である。この方法は低温化での結晶成長の他に、高濃度の不純物ドーピングにも適合していることが分り「PIVD」と名付け、シリコンデバイス低温プロセス構築の一環として研究の展開を図ってい

る。エネルギー粒子を利用した低温プロセスによる結晶成長の研究はその後も続き、シリコンのプラズマCVDやレーザCVD、複合イオンビームを用いたガリウムひ素のスパッタエピタキシーなどを手がけている。伊藤はこれらの一連の研究を通じて、半導体結晶のエピ成長には「熱に始まって熱に終わる」と言う言葉が当てはまることを悟ったようである。エピ成長に必要な基板温度に応じたエネルギーを何かの方法で償えば、プロセスの低温化は可能であるが、良い結晶を作るには熱によって得られる振動エネルギーの拡がりが必要という事である。

難波は、国内での発表、討論の場として理研シンポジウム「半導体へのイオン注入」を主催し、イオン注入技術の普及と若手技術者の養成に力を入れてゆく。この「半導体へのイオン注入」は1970年3月の第1回以来、1990年の第20回まで、毎年理研で開催されている。その他、1970年、1971年の文部省総合研究の「半導体へのイオン注入」や1970年からのイオン注入に関する国際会議、1971年のイオン注入日米セミナーなどを介してイオン注入技術の発展に尽力している。1972以降になるとイオン注入の研究に加え、イオン注入の研究を始める前からライフワークとしている電子やイオンのビーム技術を駆使した微細加工技術の研究に力を注いでゆく。イオン注入の研究を始める1965年以前は主に電子ビームリソグラフィの研究を主テーマとしており、イオン注入技術研究が一段落してきた段階で、研究の方向を再度、ビームによる加工技術に向けている。1973年2月の「第4回理研イオン注入シンポジウム予稿集」に難波は、「現在のところ、イオン注入技術は拡散法と競合しない領域で実用化が行われているが、将来の展望としては、すべての分野にわたってイオン注入が熱拡散に置き代わってゆく方向に進むであろうと思われる。イオンビーム蒸着、分子流蒸着、電子ビーム微細加工、イオンビームエッチング加工、イオン注入などの諸技術が総合的に使われるようになると、半導体工業のドライプロセス化が具体的意味をもってくようになるのではないかと考えられる」という主張を掲載している。このように徹底したビーム技術の駆使で全工程のドライプロセス化を図ることが、難波の生涯にわたる研究目的となる。難波にすればイオン注入はこれらのビーム技術のひとつにすぎない。最終的には多目的収束イオンビーム装置の実現により、不純物注入、エッチング加工、薄膜形成などがすべてマスクレスで、同種の装置で行うことである。1979年になるとイオン注入においても集束イオンビームを用いてマスクレスで注入する方式を発表している。実際に工業的に適用するためには経済性を検討してゆく必要があるが、将来を見据えた研究と言える。

伊藤はイオンビーム技術を低温化プロセスに向け、難波は電子、イオンビーム技術を全工程をマスクレスドライプロセスに向けて研究を進め、それぞれ独創的な成果を残し

ている。これらの研究成果は低温エピタキシャル技術やサブミクロン加工技術などにフィードバックされている。

Ⅲ イオン注入不純物分布の理論化

ウェーハにイオン注入した後の不純物分布がどうなるのかが問題になってくる。この問題を最も早くから研究していたのがJ. A. デービスや1968年にカリフォルニア工科大学の教授となるJ. W. メイヤーらである。彼らは当時カナダのチョークリバーにある原子力研究所で、ラザフォード後方散乱スペクトル(RBS)装置を駆使して、先に述べた固相エピタキシャル成長の現象解析やイオン注入分布の研究を行っている。1969年に、このメイヤーのイオン注入法に関する著書を唯一の成書として理論の勉強を開始したのが、東京工業大学で助教授をしていた古川静二郎である。古川は1966年頃からシリコンインパッドダイオードの研究を進めている。この研究でイオン注入装置が必要となったが、助教授という立場では購入する費用もなく、購入予算を確保するためには何かイオン注入法に関し仕事ができることを示さねばならないと考え、理論の勉強を開始する。古川が最初にトライしたのがイオン注入分布の横方向伸びである。上記メイヤーの著書の第一章に「注入イオンは横方向に拡がらない」と記載されていることに疑問を持つ。注入されたイオンが原子に衝突した後方散乱した場合、必ず横方向にも拡がるはずと考えたのである。この疑問を元に理論的検討をした結果を学会で報告したが、当時すでにJ. ギボンスの注入イオンの射影飛程などに関するデータブックがでており、これに対して会場からはどんな意義がある仕事なのかと詰問され困る。その時、アルゴリズムに特徴がある、と助け船を出したのが日立中研の徳山である。以降、徳山との交流が生まれる。また、この仕事を評価したのが、大阪大学の難波である。1971年、京都で開催されたイオン注入に関する日米セミナーのメンバーとして誘っている。その場で、ギボンスのデータから推論し、シリコンへのひ素注入のように、注入イオンの質量が基板原子のそれより大きくなるにつれ横方向の拡がりが増大する。しかし、物理的にはイオンが重くなれば直進する傾向が生ずるはずだから、横方向の拡がりは小さくなるはずでこの計算結果はおかしい。その理由は数値計算上のアルゴリズムが不適当なためであり、妥当な計算方法を使えば注入イオンの縦および横方向の拡がりはこのようになるといった報告をする。縦と横の注入イオンの分散の比($\Delta X/\Delta R_p$)をグラフで示し、従来法の問題点を明らかにしている。この提案によって注入分布が理



古川静二郎

古川のもう1つの理論に関する仕事はMOSFETのV_{th}制御にイオン注入を使用する際の酸化膜/シリコン(SiO₂/Si)という多層構造中への注入イオン分布を理論的に求める近似解法を示したことである。物理的には少なくとも注入イオンの運動エネルギー分布は急な変化をするはずがないと考え、この量がSiO₂/Si界面で接続するという境界条件をおき解析を進める。その結果、界面で不純物密度の段差が生ずるという結論になる。今では常識になってきているが、この理論も学会にて報告すると反論が多かったようである。頭ごなしに否定する人もいて、古川は発表の際にはずいぶんと緊張している。

これらの古川のイオン注入に関する業績が認められ、研究室にイオン注入装置が配備されるのはそれから間も無くである。古川は、当初の動機であったインパッドダイオードへのイオン注入実験をこの装置で実現している。

● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

置を自作し、1970年に完成させる。この年にイギリスの AERE 研究所に出張した徳山はこの装置について根掘り葉掘り質問を受けている。1973年に出版された AERE 研究所のスタッフが書いた『イオン・インプラテーション』と言う本の中に、この装置はセミインダストリアル・マシンとして紹介されている。

装置で半導体へのイオン注入のあらゆるデータを収集して
ゆく。

当初、製造現場のプロセス技術として認知してもらえなかったが、ほどなく適用先がでてくる。MOSFET の V_{th} を制御するための低濃度ドーピングが、拡散法ではうまくゆかず困っていたからである。このドーピングは SiO_2/Si 界面のシリコン側に 1 平方センチ当たり $10^{11} \sim 10^{12}$ 乗イオンという軽度の注入を 50 キロ電子ボルト程度のエネルギーで行えばできるもので、必要とする打ち込み装置も当時入手可能な簡単なもので対処できる範囲のものと好都合なものである。

すでに西松茂、夏秋（東工大で古川らと理論実験を進めた）らの努力でイオン注入を MOSFET に適用した場合の問題点をつかんでいたので、徳山は早速このドーピングをイオン注入で解決することを考える。吉田功も加わり、界面のシリコン側での注入不純物の濃度と分布が、 V_{th} に及ぼす効果を計算で求め、これを実験と比較する。打ち込み後に軽いアニールをすると、 V_{th} は気持ちよいほど計算通りにシフトする。

徳山はイオン注入の影響で界面特性の劣化や信頼性の低下を危惧して調査するが、注入により新たに界面準位が発生するが、アニール条件の選定で問題はなくなることを確認している。実際の注入では、不純物はゲートのSiO₂膜を通して注入される。この時SiO₂膜の厚さにわずかのばらつきがあるとシリコン側の不純物がわずかに変わるが、これがV_{th}に大きな変動をもたらす。この現象も、注入エネルギーとSiO₂膜の膜厚の関係のある範囲に選べば解消することがわかり、これを特許化している。

徳山らはこれらの問題を解決した後に、この技術を武蔵工場に移管する。工場では、すでに中研から移っていた植本と、前稿で触れた MOSFET では草分けの大野稔が技術面を担当し、きわめてスムーズに生産技術として定着していく。

徳山らは MOSFET の V_{th} 制御へ応用が一区切りした後、高濃度イオン注入技術の研究と実用化に乗り出す。バイポーラトランジスタのコレクタ、エミッタ拡散層の製法を拡散法から置き換えるものであり、これは MOSFET のドレイン、ソース拡散層の不純物濃度と一致する 1 平方センチ当り 10¹⁴~10¹⁵ 乗イオンの注入量が必要となる。この技術が完成すると MOSFET の不純物ドーピングの全工程をイオン注入化が可能になる。徳山らはこの研究の中で高濃度不純物注入時の 2 次欠陥、3 次欠陥の挙動が、注入条件や不純物種、アニール条件でどう変化するかを詳細に調べ、多くのことが明らかになる。

高濃度の注入できわめて重要な因子は注入速度と注入中の基板の温度であるが、これは打ち込み装置によって決まり任意に選べない。幸いにも中研4部の鹿ノ又一郎らのグ

ループが、ミリアンペア級のイオン電流が引き出せるマイクロ波イオン源を開発しており、これを使った生産用の注入装置を工場向けに作るプロジェクトが発足する。この装置開発の前段階として、マイクロ波イオン源を搭載した、回転円筒型の打ち込み室をもつ予備的な試作機が作られる。この装置はミリアンペアのイオン源が長時間安定に引き出され、従来不可能であった1平方センチ当たり10の16乗イオンの高濃度注入が可能になり、高濃度注入が十分実用になる。

工場向けの試作機は自動機構を取り入れた巨大な装置になり、今日の大電流生産用注入装置の原型とも言えるものになる。1979年に、この装置と日立中研の研究で得られたノウハウを盛り込んで、全イオン注入の、しかも低雑音のバイポーラトランジスターが高崎工場で完成する。この結果を第三回の国際固体素子コンファレンスで発表され、高濃度打ち込みの研究も一段落する。その後、間もなく、

MOEFETのソース・ドレイン拡散層に適用されることで、MOSFETの不純物ドーピングの全工程がイオン打ち込み法で形成されるようになる。

(文中、敬称を略させていただきます)

参考文献

1. 業調査会発行 大内淳義、西澤潤一 共編『日本の半導体』
2. シュプリンガー・ジャパン株式会社発行 B. L. アンダーソン、R. L. アンダーソン 著、樺沢宇紀 訳『半導体デバイスの基礎』

次回

第15回 半導体の歴史

—その14 20世紀後半

集積回路への発展(9)—