

半導体の歴史

— その12 20世紀後半 集積回路への発展(7) —



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の進歩

大野稔の半導体との出会い



日立製作所中央研究所の
返仁橋から

も歩くと目の前に谷があり、そこには橋が架けられており、欄干には「返仁橋」と橋の名前が表示されている。この名前は日立で博士号を持っている技術者の集まり「返仁会」が由来している。深い谷に茂る自然林から風に揺らぐ梢の音と深緑の香りが、つい先ほどまでの国分寺駅の喧騒を一瞬忘れさせる。この橋を渡り終えると、樺の木を中心とした広場を前に持ち、歴史を感じさせる六階建ての研究棟が現れてくる。

大野稔が中研に最初に足を踏み入れたのは1957年の8月11日である。当時は今とは違い国分寺周辺も武蔵野の静観さを漂わせ、その中にこの中研が設立されてから未だ15年目の事である。この日が、大野が半生を捧げた半導体研究の出発点となる。大野は広大ですばらしい環境の研究所に



大野稔

圧倒され緊張しながら、トランジスター部部長の宮城清吉が応接室に現れるのを待つ。トランジスター部は前述の伴野正美らの尽力により4年前の1953年に発足し、真空管を製作していた茂原工場から宮城が転任し部長となり、創設して間もない中、研究員を募っていた。大野は1952年に名古屋大学工学部電気科を卒業し、その後、特別奨学生コースを終了、引き続き工学部の助手を務めていたところ、同工学部の教授榊米一郎から勧められ、同教授と電子顕微鏡の共同研究をしていた中研の只野文哉の紹介で面会に来たのである。企業の部長と言うよりは大学教授然とした風貌の宮城に会い、ここなら旨くやって行けるとほっとする。

大野は1927年7月3日、名古屋市に生まれる。少年時代は以前に紹介した東通工の井深大らと同じようなラジオ少年であると共に、音楽を聞くこと、特に音響機器で原音に近い忠実な音を再生するハイファイ (high fidelity) を趣味としていたことなどから、少年時代から鉱石検波器、セレン整流器などの半導体製品に興味を持つ。1948年に大学に入って間もない頃、ベル研究所でのトランジスターの発明を耳にし、更に半導体への興味が増し、将来は自分の一生の仕事としたいと思うようになる。学部在学中も電気科に籍をおきながら、主要科目の変圧器やモーターの設計などに興味を覚えず、授業も適当にさぼり、ウイルソンの『メタル・セオリー』やモット、ガーナーの『イオン結晶』など、半導体物性関係の教科書を読みふけている。卒業研究には半導体に関連したテーマを取りあげたかったが、大学に半導体を専攻している研究室がなく、仕方なく次善の策として、物性研究という点で近縁の磁性材料を選ぶ。その後の助手時代を含めた6年間の磁性材料との付き合いが、後のシリコン表面安定化の研究、そしてMOSFETの実用化に役立つことになる。磁性材料の研究が無駄では無かったのである。むしろ、この研究がなかったならば、後の大野の活躍は無かったと言えるほど、磁性材料の経験を半導体の研究に生かしてゆくことになる。

大野が入社した当時の中研の半導体開発は、伴野らを中心に、4年前の1954年にウエスタン・エレクトロニクス社

からトランジスターの特許を導入し、アメリカ企業の RCA 社とトランジスター技術導入契約を結び、技術導入を行っている時期である。この頃になるとメサ型トランジスターの製法を入手するために伴野が米国出張している。研究を行うことを目的に入社した大野にとっては、RCA 社から送られてくる仕様書をそのまま着実に真似るのみの仕事に愕然とする。大野の仕事は RCA 社から送られてくる SN（スタンダード・ノティス）と言う製造仕様書の翻訳とか、インチをセンチに換算して図面を書き直すことであった。大野自身は半導体の研究ができると意気込んで中研に入ったが、トランジスター部は将来の生産工場を意図した純然たる製造部門であり、研究を主務とするところではなかったのである。それでも、夢にまで見ていたトランジスターが目の前で出来上がる喜びがあり、歩留り改善に向けた、それなりの創造性を生かすことで、わずかながらも張り合いを持ち仕事を続ける。

1958年7月になると、トランジスター部が独立事業所として中研から分離され、中研の近くの小平市上水本町に設立された武蔵工場に移転する。この新しい工場の中に技術開発部門が設けられ、大野は願い出て、この開発部門に異動し、この開発部門で、武蔵工場の工場長となった宮城からシリコントランジスターの開発を命じられる。これが大野とシリコンとの出会いである。大野を中心とした数名の開発者たちは、僅かばかりの文献を元に不純物拡散、エッチング、蒸着、組立など、トランジスター製作に必要なプロセスを一通り開発し、1960年秋頃にシリコンメサ型トランジスターを完成させる。ホトレジストの塗布などはスピン塗布装置もなく、ウェーハ上にレジストを垂らし、それを筆で塗っている様な環境であったが、十分な特性のトランジスターを完成させている。この頃、先に『半導体のはなし7』で紹介したソニーの塚田らはエビタキシャル成長技術を開発し、これによる高性能なシリコントランジスターを完成させていた時期に当たる。また、アメリカではフェアチャイルド社のノイスらがプレーナー型トランジスターを開発した年である。漸くメサ型シリコントランジスターを完成させたと言う喜びがあるものの、他社はさらに先行していることに大野はショックを受ける。特にメサ型トランジスターの製作過程で二酸化シリコンはすでに馴染みの材料であり、ベル研究の論文などで二酸化シリコンで覆われたシリコンの表面が極めて安定であることを熟知しながら、大野自身がプレーナーの発想にいたらなかったのが大変口惜しく思うと同時に、今後のシリコンデバイスはすべてこの構造に代わり、メサ型はすぐ陳腐化するに違いないと直感する。

このプレーナーショックも消えぬ翌年の1961年3月に3ヶ月間のアメリカ出張を命じられる。技術提携先の RCA 社における技術研修、調査が目的である。初めての海外出

張である。RCA 社では専任の担当者が親切に迎え入れてくれている。担当者は現場の見学、技術者との討論のアレンジ、サンプルの入手など、こまごました依頼に嫌な顔ひとつせずに対応してくれ、大野はこのことに心から感謝する。大野はこの担当者とは文通や出張の際の面会などで担当者が他界する1994年3月まで家族ぐるみの付き合いを生涯に渡って続け、その後も家族との交際を続けているようである。

大野はこの実習期間中、シリコン関連技術に重点をおいた調査を行う。RCA 社でもプレーナー型トランジスターが与えたインパクトは大きく、メサ型トランジスターはすべてプレーナー型に切り替えるという大方針が打ち出され、現場は切り替えの真っ最中であった。

帰国した大野は真っ先にプレーナーの開発に取り掛かる。大野が生涯に渡って最も大きな仕事を成し遂げるのが、帰国した1961年6月から1964年4月までの約4年間である。この4年間にシリコンデバイス開発に全精力を傾け、最終的にシリコン MOS トランジスターの実用化の目処を付けている。前稿までも述べてきたが、科学者が一生で常にアイデアを出し続けることは稀である。量子力学を構築してきた天才的な科学者たちも人生の中のほんの一瞬（数年間程度）に成果を集中的に出し、次の世代へとバトンを渡してゆくのが殆どである。大野にとっても34才から38才の、この4年間で最も充実した時期となる。その後はイオン打ち込み技術などの MOSFET 製造技術の構築に尽力して行くが、大野の名を半導体の世界に知らしめたのはこの4年間の成果が全てと言っても過言では無い。この後は、この成果を世界に広げ、半導体の発展に役立ててゆくことになる。

FC 処理 (BT 処理) 効果の発見

先に開発したメサ型トランジスターの不良発生と、このプレーナー開発での特性変動の問題に出会うことで、大野は大きな発展を得ることになる。そして、これらの問題を乗り切ることに役立ったのが、名古屋大学時代に経験した磁性材料の研究であった。その経験を生かしたところに大野の真骨頂がある。

ちょうど、プレーナー開発に着手した頃に、先に開発したメサ型トランジスターが量産段階にはいり不良が発生する。100~120℃の高温で動作寿命試験をすると、エミッタ接地時のコレクタのリーク電流が数桁以上も増大するという不良である。これは、現在の知識では、デバイスがNaイオン (Na+) に汚染された時に、Na+が可動イオンであるため、高温下でNa+に電界が加わると移動し易いと言う性質を持っていることで起こる現象であることが判っている。NPN トランジスターのベース表面に高温動作中にデバイスに加わる電界の影響により可動イオンが近づいてきて、

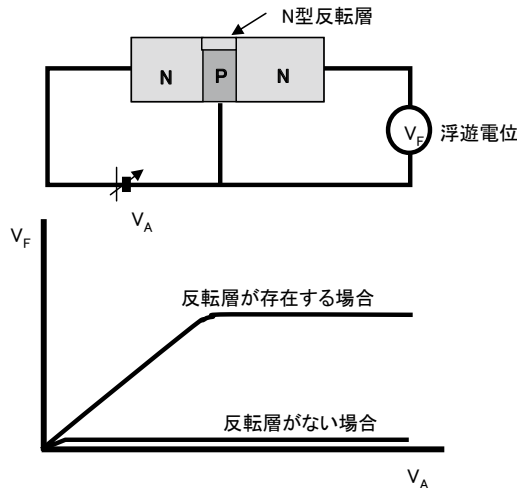


図1 浮遊電位による反転層の検出
大野稔 著『MOS トランジスタの開発小史』より

その正電荷によりベース領域の表面に反転層が形成され、これによりコレクタからエミッタに向けて反転層を通してリーク電流が流れる現象である。しかしながら、1961年当時はNa可動イオンの存在や、それが悪さをすることは未だ解明されておらず、その解明の糸口を掴んだのが、以下に述べる大野の新たな発想である。可動イオンがNaイオンであるとの同定までは至らなかったが、この可動イオンの挙動を制御できることを明らかにするのである。

大野は、まずNPN トランジスタのベース領域がどのように変化しているかを調べるために、エミッタとベース間に逆バイアスを印加し、コレクタ、ベース間に現れる浮遊電位を測定する。図1に示す様にベース領域が反転している場合、エミッタとコレクタが反転層で連結しているため、エミッタ電位を上げるとコレクタ電位も上昇する。このことを利用してエミッタ、コレクタを連結する反転層の存在をチェックすることから始める。これにより、NPN トランジスタの場合はベース領域に形成されるN型反転層が問題になること、劣化したトランジスタでは明らかにこの反転層が認められることを確認している。つぎに、この反転層はどれだけの高温で使用した時に発生するものかを知るために、室温から次第に温度を上げて行くことで反転層が形成される温度依存性を調べている。この測定で、この現象は、デバイスの使用環境温度が100℃を超えると急に発生することを確認している。当時、この高温で起こる反転現象はシリコン表面の固有現象であり制御できるものではないというのが常識であるため、大野も、これは泥沼に入ってしまったようにも思えるのかと落胆しかける。

このとき、ふと大学の研究でやっていた磁性材料における磁場冷却効果という現象が頭をかすめる。これはある種

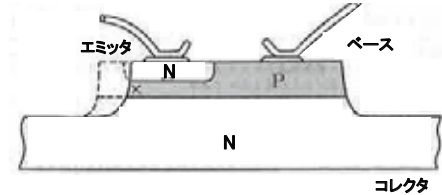


図2 点線部が過剰にエッチングされ不良となったもの
(露出されたP型ベース層(X部分)に反転層が形成される。)
大野稔 著『MOS トランジスタの開発小史』より

の磁性材料を磁場の中で加熱冷却するとその材料が磁場方向に磁化されやすくなる現象である。この現象を、このベース表面反転現象と重ね合わせて考えると、磁性体における磁界を、半導体で電界に置き換え、PN接合にも電圧をかけながら加熱すると電界の影響で反転層が形成され、室温に冷却することにより、その反転層がそのまま凍結されるのではないかと考える。この様な見方をすることで異常性を見直すときれいに説明できることに気付いたのである。

このことはまた、それまでこの反転現象はシリコン表面の固有現象で不安定で制御できるものではないと言う先入観を一変し、人為的に反転層を形成したり、消去できることを示す画期的なアイデアとなる。PN接合におけるこの効果は先に述べた磁場冷却(フィールド・クリーニング)という述語を借用し、加電冷却効果あるいはFC効果と命名、学会に報告するが、その後1964年に報告されたIBMのD.R.KeerらによるBT(バイアス・テンパラチュア)処理と言う名前に取って代わられて今日に至っている。D.R.Keerらは、MOSダイオードを用いたBT処理(FC処理)を用いて、可動イオンの影響によるC-V特性の変化を判り易く報告している。後で述べるが、このMOSダイオードを用いたFA処理は大野が発案し、最初に行なったものであるが、高温下で電圧を印加し常温に戻して特性変化量を評価する手法を最も早く考案したのも大野である。今日に至っても微細MOSFETの信頼性評価手法として使われ続けており、この効果にいち早く注目したことは、大野自身の大きな成果と言える。大野はこのFC効果をMOS研究の武器として、その後積極的に利用してゆくことで、更なる大きな発見を生むことになる。

帰国後に開始したプレーナートランジスタ開発でもベース表面の反転現象が大きな問題となってくる。NPN トランジスタでは、メサ型トランジスタの場合と同じようにP型ベース表面が往々にしてN型に反転してしまうことで、良好な特性の再現性が得られず、シリコンと二酸化シリコンとの界面の性質をはっきり理解できなければプレーナ技術は物にならないと考える。

大野はシリコンと二酸化シリコンの界面の性質を調べる

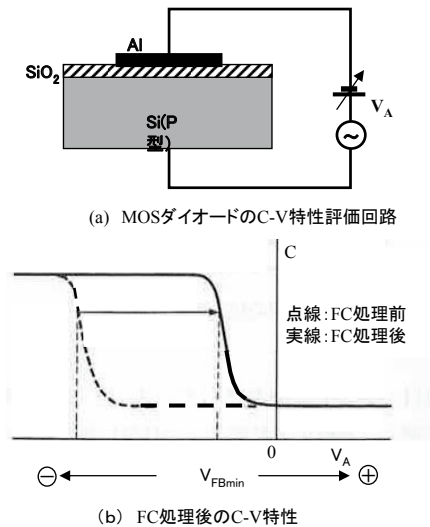


図3 MOS ダイオードとC-V 特性
大野稔 著『MOS トランジスタの開発小史』より

にあたり、この評価を行う簡単なデバイス構造としてMOS (Metal-Oxide-Silicon) ダイオードを採用する。ベース表面にのみ注力すればよいことであるために、エミッタ、コレクタを取り去り、ベース表面上の二酸化シリコンの上にメタル電極を形成し MOS ダイオードを用いることにする。この構造であればシリコン基板上を酸化することで二酸化シリコンを形成し、その上にスパッタによりメタルを形成するだけの簡単な製作工程で評価デバイスを手に入れられる。FC 効果を調べる際にはメタルとシリコン間に電圧を印加する。FC 処理前後のC-V 特性の変化からシリコンと二酸化シリコン間の界面に関する知見を引き出すことを考えたのである。このMOS ダイオードの選択は必然としてMOS トランジスタの開発へとつながって行くことになる。MOS ダイオードのシリコン-二酸化シリコン界面の特性安定化が達成されれば、その後この構造の両側のシリコン基板上にソース、ドレインを形成するだけで安定した特性を持つ MOSFET 構造となるのである。この MOSFET への発展については後で述べることにする。

シリコン結晶面方位効果の発見

当時の二酸化シリコンは今日のいわゆるクリーンプロセスとは程遠く、汚染が多くC-V 特性はFC 処理 (BT 処理) によって派手にシフトする (図4 (a))。大野はこのシフトが可動イオンによるものと検討はつけていたが、Na イオンがその元凶と突き止めるまでに至っていなかった。MOS の金属電極を負バイアスにした、いわゆるマイナスFC 処理ではC-V 特性がそれ以上シフトしない安定した最小値に達する。これは、プラスFC 処理では可動イオンがシリコン

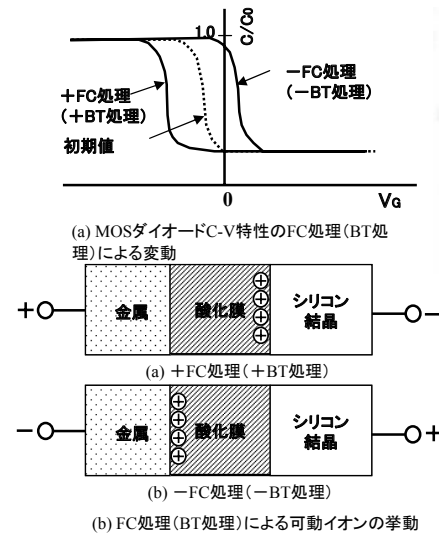


図4 FC 処理 (BT 処理) による MOS ダイオード C-V 特性変動と可動イオンの挙動 (D.R. Keer , et al)

表面に移動し、可動イオンの正電荷がシリコン表面の電位に大きく影響するが、マイナスFC 処理では可動イオンが金属電極側に移動するためにシリコン表面の電位への影響が小さくなるためである (図4 (b))、IBM のD.R.Keer らが1964年にBT 処理での可動イオンの挙動を説明し、可動イオンがNa イオンであり、二酸化シリコン膜をリン処理することで不動化できることを発表)。大野はC-V 特性がFC 処理によりシフトすること自体は、それほど意味あることではなく、FC 処理後の最小値こそがシリコン-二酸化シリコン界面のある本質を現しているのではないかと考える。可動イオンが対策され、きれいな二酸化シリコンとなった時に最適な状態が何かということに主眼点をおいたのである。普通研究者であれば、シフト量に目を奪われ、如何にシフト量を小さくし安定化をはかるかに重点を置きそうになると思われるが、ここが大野の目の付け所の良さを表していると思われる。

そして、大野はこの最小値はMOS 構成要因の何と関連しているのかを調べてゆく。その考えを飛躍させるのが、再び、大学時代の磁性材料の経験なのである。磁性材料として用いられる純鉄はシリコンと同じ立方晶で、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ という3つの主要軸がある。その磁化特性は $\langle 100 \rangle$ 方向が最も磁化され易く、 $\langle 111 \rangle$ が最も磁化されにくい。 $\langle 110 \rangle$ がその中間という前東大総長で教授の茅誠司によって発見された有名な現象があることを思いつく。そして、MOS 系でも $\langle 100 \rangle$ の界面電荷が最小になるのではないかとこの発想に至る。先のFC 効果も含めて、これは、全く大野の直感であること以外に何でもなく、論理的発想から至ったものではない。全知全能の神の導きの様

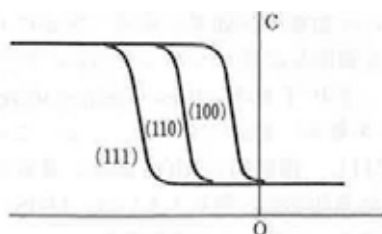


図5 MOS ダイオード C-V 特性の結晶面依存性
(マイナス FC 処理後)
大野稔 著『MOS トランジスタの開発小史』より

なものであると考えことは余りにも非現実であるので、やはり、半導体の仕事を希望しながらも悶々と続けていた名古屋大学時代の磁性材料研究の賜物なのであろう。大野はシリコン結晶方位の有用性については、実験事実を積み上げるといっても、最初に<100>方位が有利と決め込み、それが事実であることを MOS ダイオードを用いた FC 処理実験で確認していったのである。

当時、ゲルマニウムやシリコンの結晶はもっぱら (111) 面結晶が使用されている。これはゲルマニウムトランジスタで合金接合を形成する際に、フラットな接合面を得るための基本技術になっていたためである。シリコンになっても引き続き (111) 面結晶が使われていたのは、それ以外の結晶面に変える理由がなかったからである。このため (110)、(100) 面の結晶基板が手に入りにくく、大変苦労して (111) 面結晶から (110)、(100) 面結晶を切り出し、3 種類の MOS ダイオードを製作、二酸化シリコン膜中の不純物イオンを除去するためにマイナス FC 処理を施した後、C-V 特性を計ると界面電荷の最小値がきれいに (100)、(110)、(111) の順に並ぶことを確認する。大野はあまりにも見事な予想的中に驚くとともに、単なる偶然か実験の誤りではないかという疑いも消えず、何度も確認実験を繰り返し、やっと本物であると確信するまで 2 ヶ月を要している。

MOSFET やバイポーラへの適用実験を終え、大野とともに実験を続けた桃井敏光、川地陽二の 3 名の共願で特許申請を 1964 年 4 月に行っている。この出願はアメリカでは 1970 年 5 月、日本では 1973 年 6 月にいずれも審判で有効性が認められ工業所有権が確立されている。成立するまで最も長い時間を要したのが西ドイツ特許であり出願から 20 年後の 1983 年 3 月に権利が確立されるに至る。シリコンデバイス形成の上でのシリコン基板結晶方位の優位性ということで、余りにも基本的な特許であるとともに適用範囲が広いために半導体各社から一斉に異議申し立てを受けたことは言うまでも無い。特許部門が精力的に反論、あるいは証拠集めなどを行い成立させている。

U.S. Patent Dec. 28, 1976 Sheet 1 of 2 3,999,282

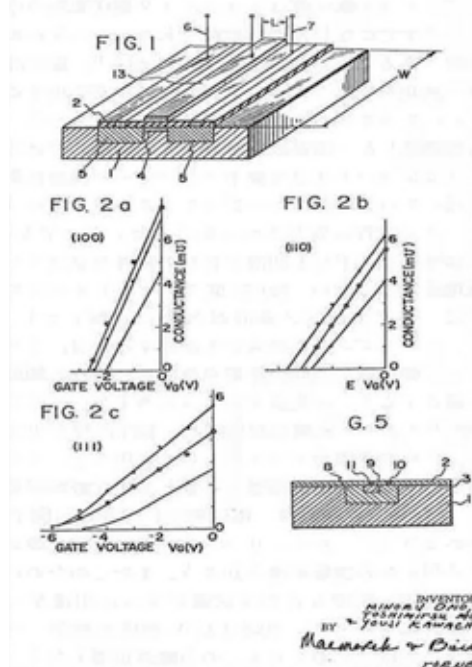


図6 (100) 面を使用する MOS トランジスタの
米国特許 (部分)
大野稔 著『MOS トランジスタの開発小史』より

<100>結晶方位がなぜ界面電荷の最小値が小さくなるのかは必ずしも明確な解は得られていないが、シリコンを酸化し二酸化シリコン膜を形成するときに膜中に含まれる過剰シリコンの量が最も少ないためと言う説が有力である。二酸化シリコン中の電荷は可動イオンによる正電荷と固定酸化膜電荷、界面トラップ電荷の 3 種類が存在する。現在のクリーンプロセスでは可動イオンは皆無であるが、1960 年代のプロセスでは可動イオンの存在は無視できないレベルである。可動イオンはマイナス FC 処理で電極側に移動すると、電荷としてシリコン界面に作用するのは固定酸化膜電荷と界面トラップ電荷のみとなる。固定酸化膜電荷と界面トラップ電荷は双方とも過剰シリコンによるものと考えられ、過剰シリコンは図 7 に示すようにシリコン界面に近いところに局在する。過剰シリコンがシリコン界面近くにあり、シリコン基板と電荷のやり取りをするものは界面トラップ電荷として働き、電荷のやり取りができない程度シリコン界面から多少離れた場所に存在するものは、イオン化し固定酸化膜電荷として働くと考えられている。このため、界面トラップ電荷はシリコン界面に加えられる電界によって電荷量は変化するが、固定酸化膜電荷は電界によらず一定の値を示す。

過剰シリコンの量は酸化条件やアニール条件、結晶方位

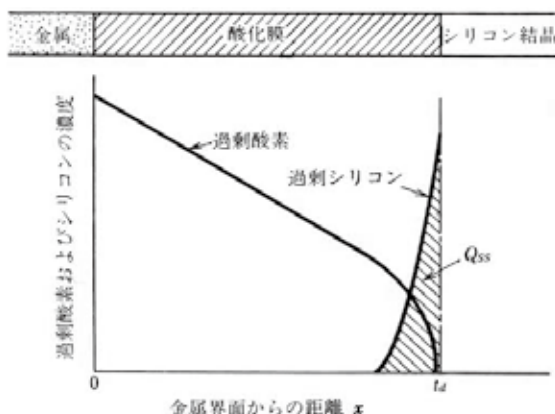


図7 二酸化シリコン中の過剰酸素と過剰シリコンの分布
岸野正剛 著『半導体デバイスの起訴』より

などに強く依存する。図8は界面トラップ密度の結晶方位依存性を示している。界面トラップ密度は結晶方位に依存し、 $\langle 100 \rangle$ 方位の結晶に対して $\langle 111 \rangle$ 方位の結晶では1桁程度電荷量が大きくなる。界面トラップ密度が過剰シリコンによるものと考え、結晶方位によってその数に差があると推測される。この結晶方位依存性はそれぞれの結晶での酸化速度の差から来るものと推定されている。図9にそれぞれの結晶面、表1に単位面積当たりの結合手の数を示す。 $\langle 100 \rangle$ に比べて $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ の順で結合手の密度が多くなり、この結合手の密度が多いものほど、酸化速度が速くなる。この結果、酸化速度の大きい結晶ほど過剰シリコンが多くなり、結果として、酸化速度の小さい $\langle 100 \rangle$ 方位結晶の過剰シリコンが少なく、シリコン界面の電荷量が最小となると推測されている。

後年、大野の次女がアメリカ留学中、コンピュータ教育を受けた時、何かの拍子に「オオノ・パテント」というのが出てくる。日本では「100特許」と言って名前が出ないが、アメリカでは個人名を出す。彼女が自己紹介する時、「オオノ・パテントのオオノの娘です」と言うと、みんな「オー」と分かってくれたそうである。「お父さん、なんであんなに有名なの？と不思議がっていました。若い時にああいう開発をやっておいてよかったなと思いますね」と大野は話している。1964年当時、MOS開発で先行していたRCA社やベル研究所から、なぜこの様な特許が出てこなかったかを大野はそれぞれの会社の関係者に確認している。RCA社のMOS開発のリーダーだったE.O. ジョンソンは部下に結晶面の検討を行わせたが(100)面が最も悪いと言う実験結果がでたと報告を受け、それきりになったとのことであり、ベル研究所ではMOS開発者の1人であるD. カーングが武蔵工場を訪問した時に話を聞いている。MOSFETを試作して、遭遇した第一の問題はしきい値電圧が異常に大きく正

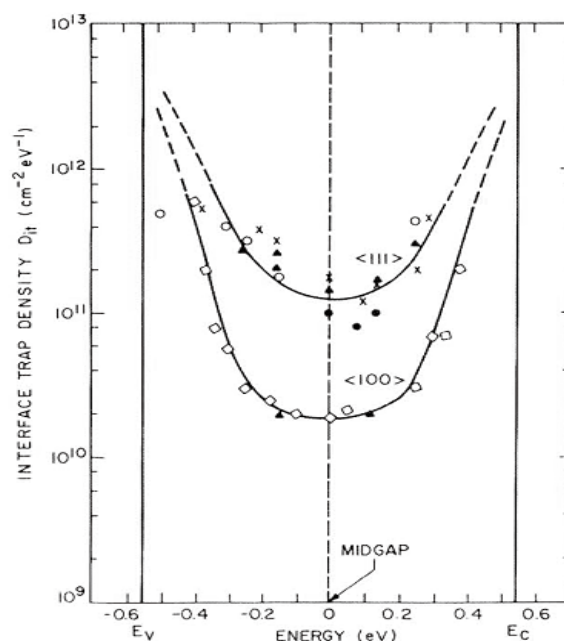


図8 シリコン界面におけるトラップ密度結晶方位依存性
S.M.Sze 著『Physics of Semiconductor Devices』より

常に動作しないというものであったが、その原因は二酸化シリコンの汚染によるものと推定、そのクリーン化問題に取り組んでいた別のグループに頼み、予想通りその問題を解決したと言う話であったようである。結果として、磁性材料からの応用を思いついて、それをやり通した大野のみが辿り着いた結論であったと考えられる。

III MOSFETの開発

大野は真空管時代からハイファイに強い関心があり、試作した各種のトランジスタを使ってオーディオアンプを組み立て、音質を比較することに興味を持っていた。この比較にMOSFETなどの電圧駆動型の素子を使ったアンプではどんな音質がえられるのか、一度比較して見たいと考えていた。しかし、当時、拡散技術はFETが作れるほどの精度はなく、イオン打ち込み技術もまだ開発されておらず、容易ではなかった。そのような中でMOS研究の過程で得られた知見を利用して、シリコン-二酸化シリコン界面に形成される反転層を利用すればFETが比較的容易にできると判断し、MOSFETの開発に着手する。これまでのMOS研究の成果とMOSFETの試作結果を、1964年4月、10月の2度にわたり電子通信学会にて発表している。このデバイスが国内で最初のMOSFETとなるが、期待したほどの反響がなくがっかりしている。この発表のあとに日刊工業新聞の記者からMOSFETの特徴と将来性を聞かれ、大野は「やはりバイポーラが主役で、これを米のご飯とす

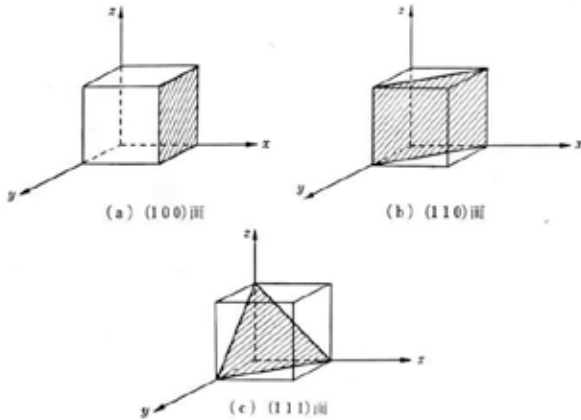


図9 代表的な結晶面

ればMOSはラーメンといったところでしょう」などと答えている。この時点では大野もMOSが今日のように発展することは想像できなかったようである。MOSFETに目が向けられてくるのは1966年の秋頃となる。それまでの2年間は需要もなく、大野自ら計測器メーカーなどに営業活動を行っていたが、全くといって良いほど売れず、社内でもMOSFETの製品化やその将来性を疑問視する向きが大勢であり、大野にとって最も苦しい時期となる。売れないものは早く止めてしまえという声が高まっていた。

転機がきたのは1966年秋である。その当時、武蔵工場長となった伴野正美がアメリカに出張した時に、RCA社幹部からMOSの開発を重要プロジェクトとして取り組んでおり、日立でもよいものが出来ているようだがどんな状況かと熱心に問い詰められる。それまでMOSに関心を持たなかった伴野もこのRCA社とのやり取りで、MOSの重要性を見直す。帰国すると直ぐに大野を呼び、「大野君、キミのMOSが話題になっているから、すぐに行って調べてこい」とアメリカへの出張を命じている。大野が出張している間に当時、電卓メーカーのシャープから「MOS・ICを電卓用に作ってくれ」と注文が入り、これらの一連の出来事で急激に社内の雰囲気も変わってくる。それから間もなく柴田

表1 各結晶方位のシリコン結晶の単位セル面積当たりの原子数と有効な結合手と1cm²当たりの原子密度、有効な結合手密度

S.M.Sze 著『Physics of Semiconductor Devices』より

Orientation	Plane Area of Unit Cell (cm ²)	Atoms in Area	Available Bonds in Area	Atoms/cm ²	Available Bonds/cm ²
{111}	$\sqrt{3}a^2/2$	2	3	7.85×10^{16}	11.8×10^{16}
{110}	$\sqrt{2}a^2$	4	4	9.6×10^{16}	9.6×10^{16}
{100}	a^2	2	2	6.8×10^{16}	6.8×10^{16}

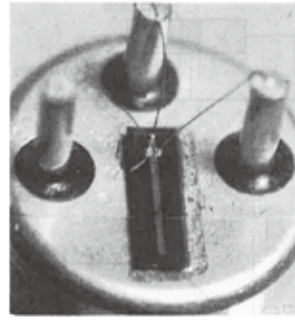


図10

国内初のシリコンMOSトランジスタ

大野稔 著『MOSトランジスタの開発小史』より

正太郎をリーダーとするIC開発体制が敷かれ、本格的なMOSICの開発が開始され、1967年にはPチャンネルの第一世代MOSIC「HD700シリーズ」が世に送り出される。この時の最小加工線幅は15μmである。それ以降MOSICは年々集積度を上げ、またクリーン化技術が向上するに従いPチャンネルからNチャンネルへ、さらにはCMOSへと、その間にはシリコンゲート構造、イオン打ち込み技術の導入などを経て、ICからLSIへと発展し続けてゆく。

これらのMOSFETの実用化は、これまで記載してきたように、シリコン表面の安定化技術がベースとなる。この安定化技術は前々回に紹介した徳山らのLTP技術を発端とした保護膜技術や半導体各社でのクリーン化技術の発展がNa可動イオンの影響を最小限にしてゆく。更に大野らの<100>結晶方位の結晶面を用いることや二酸化シリコンの形成プロセスの最適化などを経て固定酸化膜電荷や界面トラップ電荷が減少し、シリコン界面の安定化が図られ、MOSFET特性が安定してくることでMOS-IC、LSIへの道が開かれてゆく。

(文中、敬称を略させていただきます)

参考文献

1. 応用物理 第66巻 第3号 (1997) 大野稔 著『MOSトランジスタの開発小史』
2. 業調査会発行 大内淳義、西澤潤一 共編『日本の半導体』
3. シュプリングー・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』
4. 野正剛 著『現代 半導体デバイスの基礎』
5. D.R. Keer et al.: "Stabilization of SiO₂ Passivation Layers with P₂O₅", IBM J.8.376 (1964)
6. S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley and Sons, Inc

次回

第14回 半導体の歴史

—その13 20世紀後半

集積回路への発展(8)—