

審査の結果の要旨

氏名 三瀬信行

現代の情報通信技術の根幹を支える Si-CMOS 技術は、微細化による性能向上の飽和傾向、消費電力の爆発的増大という基本的な壁にぶつかっている。この壁を打ち破るために、新材料の開発、材料界面の制御、新プロセス技術の開発などにより実効的に性能を向上させる研究が世界中で進められている。しかし、場当たり的な手法になりがちであることや、それに付随する膨大なコスト上昇などのために、研究開発のスピードが落ちていると言わざるを得ない。このような背景のもと、本論文は、金属ゲート及び高誘電率ゲート絶縁膜を有する Si-CMOS（以降、Metal/High-k CMOS）の問題点を洗い出し、その問題を構成材料の理解および異種材料界面の制御という観点から極微細 CMOS 性能の向上を検討したものである。

内容は 6 章から構成されており、技術的には(1)トランジスタ断面構造の縦方向一次元的な微細化に伴う問題、(2)横方向二次元的な微細化に伴う問題、(3)ソース・ドレインにおける電極と Si との接合形成にかかわる問題と区分けし、結論として極微細 Metal/High-k CMOS にふさわしいトランジスタ構造を提案している。

第 1 章は序論であり、Si-CMOS 微細化の指針および課題をまとめている。従来はトランジスタ構造と外部から与える電圧によって、内部ポテンシャルがポアソン方程式に従う形で決定され、それをいかに制御するかという形で技術開発がなされてきた。しかしながら、微細化とともにサイズそのものから生じる限界、境界界面が内部に与える影響の増大などから、単純な形状微細化だけでは問題の解決にはならないことを示し、新材料の開発が必須であることを特に Metal/High-k CMOS に関してまとめている。

第 2 章では、Metal/High-k CMOS の断面を縦方向に一次元的にみた場合の技術課題および物理的な理解に関して、トランジスタのしきい電圧とキャリア移動度に焦点をあて申請者の実験結果にもとづいて議論している。高誘電率ゲート絶縁膜を用いたトランジスタのもっとも大きな課題はしきい電圧が予測通りにならない点であった。その原因は、高誘電率ゲート絶縁膜と界面に存在するシリコン酸化膜との間に双極子が形成され、その向き及び大きさが材料によって異なることによると理解されている。その理解に基づくと、双極子をうまく使うことができればしきい電圧制御に使えるということが予測される。申請者はこの技術を使うことによって、現在使われている手法に比べ大幅に簡略化されたプロセスで CMOS を構築できることを実証した。これは Metal/High-k CMOS 作製におけるゲートファーストプロセスとよばれる方式である。以上はしきい

電圧に関することだが、シリコンチャンネル近くに双極子が形成されることは伝導キャリアの散乱体として働かないかという懸念がある。申請者は詳細な実験から逆向き双極子が存在することによって移動度が上昇することを初めて見だし、本技術がしきい電圧制御だけでなく移動度に対しても影響を及ぼしていることを実験的に示した。

第3章では、トランジスタ断面の横方向に着目した課題に対して議論している。第2章では薄膜化が主な議論の対象であるが、第3章では微細加工技術そのものが影響してくる短チャンネル効果に関するものである。これも従来は、ポアソン方程式を解いたあとの半導体内部のポテンシャル分布の問題として取り扱われてきた。ところが電極を加工して現れた側面に異種材料が接し熱処理が加えられることによって、電極界面付近が材料的に変質してしまうことが懸念される。申請者は界面で接する材料として可能性の高い窒化シリコン膜に焦点をあて、その製膜手法による違いを含めて調べた結果、金属ゲートの界面部分の仕事関数が明らかに変化することを見いだした。窒化シリコン膜はトランジスタ動作のなかでは能動材料ではないが、接していることによって金属電極の仕事関数を変化させ、しきい電圧を変化させてしまうことを明確に示している。

第4章は、ソース・ドレイン電極としてニッケルシリサイド (NiSi_2) を形成することによって、まったく新しい電極形成法を提案し実証している。ニッケルのスパッタリング堆積中に窒素ガスを導入、その後に熱処理をすることで本来 NiSi が形成される温度で NiSi_2 が形成され、(111)面に原子レベルで平坦な界面が形成されることを見いだした。Si(100)面にトランジスタを構築する場合を考えると表面に 54.7 度の角度をもってエピタキシャル界面が成長することを意味する。本技術を SOI(Silicon on Insulator) 基板上の物理ゲート長が 6nm トランジスタに適用し動作実証に成功している。また、本技術は超微細トランジスタ動作というだけでなく微細化で大きな問題になる加工バラツキの問題を大幅に回避させる重要な技術としても位置づけられる。

第5章は第2章から第4章までをまとめている。

第6章では、さらに上記の技術課題に対する理解と対策に基づいて、現実的に可能性の高い今後の Si-CMOS の方向性に関して議論している。

以上のように本研究は、Si-CMOS 技術が直面する問題に対して材料あるいは材料界面の理解・制御という観点から新しい Si-CMOS 技術を提案し、“材料界面制御による極微細 Metal/High-k CMOS の高性能化に関する研究”としてまとめている。現在も進展しつつある技術開発の中で極めて重要であるというばかりでなく、本論文で議論されている材料界面反応による双極子散乱変調、仕事関数変化、固相エピタキシャル界面形成など、半導体技術の中における材料科学・材料工学分野への寄与は極めて大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。