

審査の結果の要旨

氏名 王 盛凱

シリコンマイクロエレクトロニクスは衰えるところを知らず高性能化は進んでいる。しかし、その中身は旧来の微細化による手法だけではなく新しい材料の導入が必須になりつつある。基本素子である CMOS 用トランジスタに関しては、まさにシリコン (Si) が 100%の重要性をしめてきたが、またその限界も見え始めている。そのもっとも大きな要因は集積回路としての消費電力の増大である。微細なトランジスタが実現できても集積回路を構成した時に膨大な消費電力の上昇が避けられない。この本質的な課題を克服するために低電圧動作が可能であるトランジスタの開発が求められている。しかしスピードを犠牲にしないという条件を満足するものでなければならない。そこで Si に比べて本質的に高速動作が期待される高移動度半導体材料に期待がかかっている。その中の極めて重要な候補材料としてゲルマニウム(Ge)が考えられている。Ge は Si 以前にトランジスタ材料として研究がなされた材料であるが、安定な保護膜の形成が難しいという観点で Si にとって代わられたと言える。逆にいえば、この部分を本質的に克服できれば Ge はその潜在的能力を発揮できる可能性がある。

上記の観点から、本研究では Ge 上の絶縁膜材料、特に二酸化ゲルマニウム(GeO_2)に注目している。特に Ge/ GeO_2 界面反応の特徴を実験的に抽出し、それに対して速度論的解析手法を適用し材料の特徴を議論している。本論文は6章からなる。

第1章は序論であり、トランジスタの微細化、Ge導入の理由と問題点を整理し、本研究の目的と位置づけを明確化している。

第2章は本研究を進めるにあたって試験用薄膜材料の形成手法および評価手法について詳述している。製膜は各種条件を変えた熱酸化およびスパッタリング法を用い、また膜厚の測定技術として斜入射X線反射率評価と分光エリプソメータ評価を用いている。本研究では昇温脱離試験法(TDS)が特に評価の中心的役割を果たしているため、その解析手法、温度校正などを含めて詳述している。

第3章では、実際にTDSを使ってGe基板上に作製した GeO_2 膜を真空加熱した実験によるGeO脱離の解析を行った結果を詳述している。この脱離反応がGe/ GeO_2 界面における反応に誘引されたものであることは定性的な実験でわかっていたが、本研究ではこれを定量的に明らかにした。さらにTDSでは脱離してくる原子・分子の質量を決定できるので、Geあるいは酸素(O)の同位体を用いることで、それぞれの原子がどこに存在した原子であるかを同定することができる。その結果、反応は界面で起きているがGeOの脱離に関してはGe

もOも脱離前には表面に存在したものであることが実験的に明らかになった。この結果は本研究の核をなす結果である。さらにGeとOの拡散係数の違いを二次イオン質量分析法 (SIMS) によって決定し、その結果からGeとGeO₂が反応する界面とGeOとして脱離をする表面は膜中の酸素の拡散 (あるいは酸素空孔の拡散) によって結びつけられていることを明らかにした。この解明は本系を考える上で本質的な理解であり、Geデバイスの界面形成を考える上で極めて重要な知見といえる。さらにTDSの結果からGeOの脱離には二つの領域があり、初期の均一脱離領域と、より高温における不均一脱離領域に分けられることを初めて明らかにした。

第4章はGe基板上におけるGeO₂の結晶化について述べている。GeO₂は一般的に800°C以上の温度でαクォーツ型に結晶化することが知られているが、本研究ではGe基板上で660°Cという温度で明瞭な結晶化が観測されることをX線回折、透過電子顕微鏡によって示し、さらに第3章でモデル化した酸素空孔拡散モデルを用いて本現象を説明している。

第5章では、上記の理解に基づいてGeの熱酸化モデルに言及し、Siでよく知られているDeal-Groveモデルとは異なり、Geの場合には常に酸化と脱離の両方を考慮せねばならないことを議論している。できるだけ純粋な酸化過程に近づけるには、できるだけ酸素圧力が高い状態で酸化するか低温で酸化するかが必要であり、酸化膜質という観点から高压酸化の有用性を示すものである。さらに、Ge/GeO₂とSi/SiO₂の違いが基本的にどこから生ずるかに関して考察し、Ge原子に存在する3d電子がGeO₂の正四面体ユニット構造をSiO₂よりも不安定にしているという酸化物を考える上で極めて示唆的な議論で全体を締めくくっている。

第6章は以上の総括である。

以上を要するに、本研究はGe/GeO₂において観測されるGeOの脱離現象に関する速度論解析から酸素欠損拡散モデルを提案し、それによってGeの酸化モデルを提案、さらに本研究によって新たに見つけられたGeO₂膜の低温結晶化に関して合理的な説明を与えた研究報告になっている。これらは本系において初めて解明された研究成果であり、マイクロエレクトロニクス分野だけでなく材料工学の観点からも意義は大きい。

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。