

氏名(本籍)	ふたせたくや 二瀬卓也(北海道)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第6033号			
学位授与年月日	平成24年3月23日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	論理高集積回路に向けたニッケルシリサイド薄膜のナノ組織制御			
主査	筑波大学教授	工学博士	木塚徳志	
副査	筑波大学教授	工学博士	山部紀久夫	
副査	筑波大学教授	工学博士	末益崇	
副査	筑波大学准教授	工学博士	金熙榮	
副査	筑波大学准教授	工学博士	谷本久典	

### 論文の内容の要旨

微細高集積化が進む論理集積回路では、トランジスタの高速動作及び低消費電力化のため、さらにはシリコン(Si)層への金属元素拡散防止のために金属-シリコン金属間化合物(シリサイド)がゲートや拡散領域の電極として使われている。このシリサイド電極の形成には、まず金属薄膜をSi基板全面に成膜後、熱処理によりSi部分のみで固相反応させ、Si部分以外の未反応金属薄膜を除去する手法が用いられる。従来のコバルトダイシリサイド( $\text{CoSi}_2$ )やチタンダイシリサイド( $\text{TiSi}_2$ )に代わり、現在では、処理温度が低く微細構造への熱負荷がより少ないニッケルモノシリサイド(NiSi)薄膜が用いられている。その際、高抵抗のニッケルダイシリサイド( $\text{NiSi}_2$ )相の形成を抑制する技術が重要であり、スパッタ成膜したNi膜を一段目の熱処理によりダイニッケルシリサイド( $\text{Ni}_2\text{Si}$ )とした後に、Siと未反応の余分なNi膜を除去、二段目の熱処理により $\text{Ni}_2\text{Si}$ をNiSiに変態させる二段階熱処理が従来用いられている。加えてSiとの過剰反応の抑制のために、赤外線ランプやレーザー、マイクロ波を用いた急速昇降温加熱法の適用も試みられている。さらには、 $\text{NiSi}_2$ の形成抑制元素として知られる白金(Pt)のNiへの添加も行われている。しかしながら、微細化に伴ってトランジスタ間の狭小部分でスパッタNi薄膜の膜厚が他の領域に比べて薄くなる“シャドウイング”効果が顕在化し、Si上に成膜したNi(Pt)膜を一段目の熱処理で全て $\text{Ni}_2\text{Si}$ とする従来の方法(フルコンバージョン法)では、前述の対策だけでは薄いNi膜部分で熱処理が過剰となり $\text{NiSi}_2$ が形成されやすくなってきている。一方、NiSi薄膜から上層部の多層配線までにはチタン/チタンナイトライド(Ti/TiN)層を介したタンگステン(W)コンタクトが使われているが、微細化がより進んだ論理高集積回路に用いるにはTi/TiN層の抵抗が高すぎるのが問題となってきた。従来と異なる手法で低抵抗Ti/TiN層の形成が試みられているが、NiSi薄膜の表面清浄性が良くないと逆に高抵抗化・不導通となる問題も指摘されている。

本論文における研究目的は、従来手法では対応が難しくなってきたNiSi薄膜の形成において、より微細化した場合でも均質で低抵抗なNiSi薄膜及びTi/TiN層が形成できる技術を確認することであり、次世代デザインルールにも適応した論理高集積回路の製造技術に資することである。

本論文では一章にて論理高集積回路でのNiSi薄膜形成における問題について全体的な説明をしたあと、二章から四章にて、本論文の要である、膜厚が素子パターンに依存せず一定でかつ均質なNiSi単相薄膜の形成技術について述べている。さらに五章にて低抵抗なTi/TiN層をNiSi薄膜上に形成する技術について述べ、六章にて研究全体の総括を行っている。

本論文で用いられた、素子パターンに依存しない均質なNiSi薄膜形成のために新しく適用した“パーシャルコンバージョン法”及び得られたNiSi薄膜の組織や特性、さらには形成機構について、以下に要約する。パーシャルコンバージョン法とは、必要量以上のNi(Pt)を十分にスパッタ成膜し、一段目の熱処理において目標となるNiSi膜厚となるのに必要な量のNi<sub>2</sub>Si薄膜を形成する手法である。その後余分なNi(Pt)を除去し、均一厚さのNi<sub>2</sub>Siに対して二段目の熱処理を行うことで均一的なNiSiへの変態を行う。スパッタ膜厚ではなく一段目の熱処理における拡散反応によりNi<sub>2</sub>Si薄膜を制御して形成するため、シャドウイング効果の影響を受けず、素子パターンに依存しない均一な膜厚のNi<sub>2</sub>Si薄膜の形成が行え、二段目の熱処理によって一定の厚さの均質なNiSi薄膜を形成することが可能である。さらに、詳しく分析を行ったところ、パーシャルコンバージョン法で形成されたNiSi薄膜ではスパッタターゲットよりもPtの富化が生じていること、フルコンバージョン法でのものに比べて粒径がそろった微細結晶組織となっていることが新たに明らかになった。そして、パーシャルコンバージョン法でこのような組織のNiSi薄膜が形成される理由として、一部のNi(Pt)が残された状態でのシリサイド化反応であるために一段目の熱処理では熱力学的に安定なNi<sub>2</sub>Siが選択的に形成されること、またPt濃度の富化により二段目の熱処理時に異常粒成長やNiSi<sub>2</sub>形成が抑制されていることを推論している。また、パーシャルコンバージョン法においても、二段目の熱処理が十分でなくNi<sub>2</sub>Siが残留する場合には、その後の上層構造形成時の熱処理時にNi<sub>2</sub>SiからNiSiへの変態が生じ、そのときの拡散によって空孔集積型(ポイド型)欠陥が形成され、断線不良に至る現象が新たに見出され、パーシャルコンバージョン法を適用した場合でも二段目の熱処理で完全にNiSi単相とすることが重要であることを示した。五章では、NiSi薄膜上に低抵抗なTi/TiN層を形成するにおいて、NiSi薄膜の清浄化に利用されるフッ化窒素とアンモニアを用いたケミカルドライクリーニングの問題点として、表面フッ化物の残留による接合界面の高抵抗化や残留フッ化物から形成される酸化物に起因する断線現象が生じることを明らかにした。さらにその対応策として、残留フッ化物の除去には四塩化チタン(TiCl<sub>4</sub>)ガス処理、酸化物除去にはアンモニアガス処理が有効であることを明らかにした。

以上に述べた、パーシャルコンバージョン法や表面ガス処理による表面洗浄法を新たに適応することで薄膜のナノ組織制御を図ることにより、論理高集積回路のトランジスタ配線の低抵抗化や製品歩留まり率を向上させただけでなく、次々世代の22nmプロセスデザインまでも適応可能なNiSi薄膜の形成技術を確立した。

## 審査の結果の要旨

均質で低抵抗なNiSi薄膜形成のために、本論文で検討された技術及び作製された薄膜のナノ組織や物性、そしてその形成機構などについて質疑応答を行った。特に作製技術で中心的な役割を担うパーシャルコンバージョン法について説明を求め、まず、従来法で形成されたNiSi薄膜と各種特性を比較可能とするべく導入したメタル消費率(MCR)が新規で独自の概念であり、それをパラメータとした統一的な膜質の説明・解釈が学術的に妥当であることを確認した。そして、これまでの問題点の整理からパーシャルコンバージョン法の適応に至った経緯、種々の測定結果から明らかになった従来法で形成されたNiSi薄膜に対する問題、さらにはパーシャルコンバージョン法で形成されたNiSi薄膜の特長やその形成機構について説明を受け、その工学的な意義及び論理的推察の妥当性について検証した。加えて、実際の回路作製にパーシャルコンバージョン法を適用したときの性能や生産性向上についても説明を受け、次々世代の論理高集積回路まで適用可

能な技術であることを確認した。以上のように、本論文には、論理集積回路の微細化に貢献する工学的な技術開発にとどまらず、ナノ組織による薄膜物性制御にも資する成果が示されており、学術的に優れた論文である。よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。

平成 24 年 2 月 17 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。