

平成21年 4月30日現在

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18686005

研究課題名(和文) Geエレクトロニクスに向けた低抵抗・超平坦金属/Ge
コンタクト形成技術研究課題名(英文) Formation technology of ultra-flat metal/Ge contacts
with low resistance for Ge electronics

研究代表者

中塚 理(NAKATSUKA OSAMU)

名古屋大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：20334998

研究成果の概要：次世代超々大規模集積回路の高性能化、低消費電力化に期待される高移動度ゲルマニウム(Ge)チャネルデバイス実現のために、金属電極/Ge界面の低抵抗化、熱的安定性向上を目指して金属/Ge界面の結晶構造および電気伝導特性制御に関する研究を行った。ニッケルジャーマナイド(NiGe)への白金(Pt)添加を施し形成した(Ni_{1-x}Pt_x)Ge層によって、従来のNiGeよりも熱的安定性に優れたジャーマナイド/Geコンタクト形成に成功した。また、金属/Ge界面制御を施した金属/GeコンタクトのSchottky障壁高さ評価から、フェルミレベルピンングを解消し、低Schottky障壁高さを実現するための知見を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
総計	23,400,000	7,020,000	30,420,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：ゲルマニウム、コンタクト、界面、ジャーマナイド、ULSI、プロセス技術

1. 研究開始当初の背景

現代の高度情報化社会の進展を支えるシリコン(Si)系超々大規模集積回路(ULSI)の高性能化は、これを構成する基本素子である金属-絶縁膜-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)をスケールリング則に沿って微細化することで達成されてきた。しかし、近年MOSFETのサイズが数十nmに到達するにいたって、従来材料の物性的限界から生じる様々な問題点が顕在化している。その為、今後ULSIをさらに高性能化するためには、スケ-

リング則に頼らない、従来にない新材料、新構造を用いる改革的技術導入が必要である。特に、元来用いられてきたSi基板に代わって、歪Siチャネル、あるいはさらに先の世代ではゲルマニウム(Ge)チャネルを導入し、キャリア移動度向上を図る技術が、技術ロードマップ上からも必須とされている。

Geチャネルを導入したMOSFETの実現を検討するとき、金属/Geコンタクトを含めたデバイス構造および作製プロセスの大幅な刷新が必要となる。極微細MOSFETのコンタク

ト構造において、要求される項目は以下の3点に集約される。すなわち、①低抵抗、②電極材料および界面の熱的・化学的安定性、③電極表面および界面の平坦性である。

現在、MOSFETには $10^{-8}\Omega\text{cm}^2$ 台の低コンタクト抵抗率が要求されている。その実現には、p型、n型双方のコンタクトに対する低いSchottky障壁高さ(SBH)の実現と、半導体(この場合Ge)への高不純物ドーピング技術が必要である。また、Geの小さなバンドギャップを活かしたSchottkyソース/ドレイン構造の検討にも重要性がある。

電極の熱的安定性については、Siに比べGeが低融点な材料であることが(Si: 1415°C、Ge: 937°C)、材料・プロセス開発を難しくしている。また、極微細Geデバイス作製への自己整合プロセスを考えると、電極材料の化学的安定性も重要となる。

さらに、MOSFETのソース/ドレイン領域における極薄接合は10nmのオーダーに達していること、あるいは極薄のGOI層を用いることを鑑みると、将来、金属/Ge界面の原子尺度での超平坦性が要求される。

Geエレクトロニクスを考える上で、以上の課題を満足する金属/Geコンタクトの系統的な研究と形成プロセスの開発は、極めて緊急性かつ重要性の高い課題である。しかし、金属/Geコンタクトの材料選択について、明確な回答は存在しないのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究では、新世代のULSI構造として最有力候補の一つであるGeエレクトロニクスに向けた、低抵抗かつ超平坦な金属/Geコンタクト構造の実現を目的として、熱的安定性、低コンタクト抵抗、表面・界面平坦性を満足するコンタクト材料の探索とその形成プロセス開発を行った。具体的には、第一にNiなどの遷移金属、Erなどの希土類金属、およびPt等貴金属やそのシリサイドあるいはジャーマナイドを候補材料として、そのコンタクト物性評価および系統的な材料探索を目指した。第二に様々な界面反応制御および結晶構造制御技術を駆使して、Ge上への低抵抗・超平坦エピタキシャルコンタクト形成技術の構築を目的に研究を推進した。

3. 研究の方法

金属/Geコンタクト試料はGe(001)ウェハ上に各種金属を成膜する方法により作製した。金属の成膜には超真空チャンバ内における電子線蒸着法を用いた。膜厚10~20nmの金属層を成膜後、真空中での熱処理、あるいは試料を大気中に取り出した後の石英チューブ中の熱処理によって、金属とGeとの固相反応により、ジャーマナイド層を形成した。

X線回折(XRD)法、透過電子顕微鏡(TEM)、

走査電子顕微鏡(SEM)などにより、ジャーマナイド/Geコンタクトの結晶構造を評価した。また、4探針法によりジャーマナイド薄膜のシート抵抗を、電流-電圧(I-V)測定、および容量-電圧(C-V)測定により、ジャーマナイド/Ge界面の電気的特性をそれぞれ評価した。ジャーマナイド/Ge界面のSBHをI-V特性、およびC-V特性により評価した。

4. 研究成果

(1) 異種元素添加によるNiGe/Geコンタクトの熱的安定性改善

はじめに、近年Geデバイスにおいて、応用が期待されるNiGe/Geコンタクトの結晶構造、熱的安定性を評価した。Ni(10nm)/Ge(001)基板構造を300°Cで熱処理することで形成されるNiGe薄膜は、Ge基板に無関係な結晶方位関係を持つ多結晶薄膜であった。このNiGe薄膜は、400°C以上の熱処理によって、結晶粒の凝集が生じ、熱処理温度の増加とともに、薄膜構造の破壊とシート抵抗の大幅な増大が生じる、熱的に不安定な構造であることがわかった。

次に、Ni/Ge界面へのPt薄膜層挿入がNiジャーマナイド薄膜の結晶構造や熱的安定性に与える影響について、実験を行った。Ni(7.4nm)/Pt(2.6nm)/Ge(001)基板の多層構造から300°Cの熱処理によりジャーマナイド膜を作製したところ、Ge基板に擬エピタキシャル的に強く配向した(Ni_{1-x}Pt_x)Ge多結晶薄膜が形成されることがわかった。図1に400°C、500°C、550°C、および600°C熱処理後のNi/GeおよびNi/Pt/Ge試料の表面SEM像を示す。NiGe膜と比較して明らかなように、この(Ni_{1-x}Pt_x)Ge膜は、550°C、30秒間の熱処理に対しても安定な構造を示した。図2に、Ni/Ge、Pt/Ge、およびNi/Pt/Ge試料のシート抵抗値の熱処理温度依存性を示す。Ge基板に形成した(Ni_{1-x}Pt_x)Ge層においては、550°Cまでシート抵抗は安定であり、NiGe層よりも熱的安定性が150°C向上することがわかった。Ptの導入によって、NiGe薄膜の配向性が高まった結果、ジャーマナイド/Ge界面の安定化が生じ、薄膜の熱的構造安定性が向上したと考えられる。

さらに、NiGe、PtGe₂および(Ni_{1-x}Pt_x)Ge/Geコンタクトを形成し、その電流-電圧特性、容量-電圧特性を評価した。NiGeおよびPtGe₂/GeコンタクトのSBHは、容量-電圧測定から、それぞれ0.68eVおよび0.66eVと評価された。一方、(Ni_{1-x}Pt_x)Ge/GeのSBHは0.45eVとなり、従来報告されているFermiレベルピンギングでは説明できない結果が得られた。原因として、コンタクト形成前のGe表面の清浄化

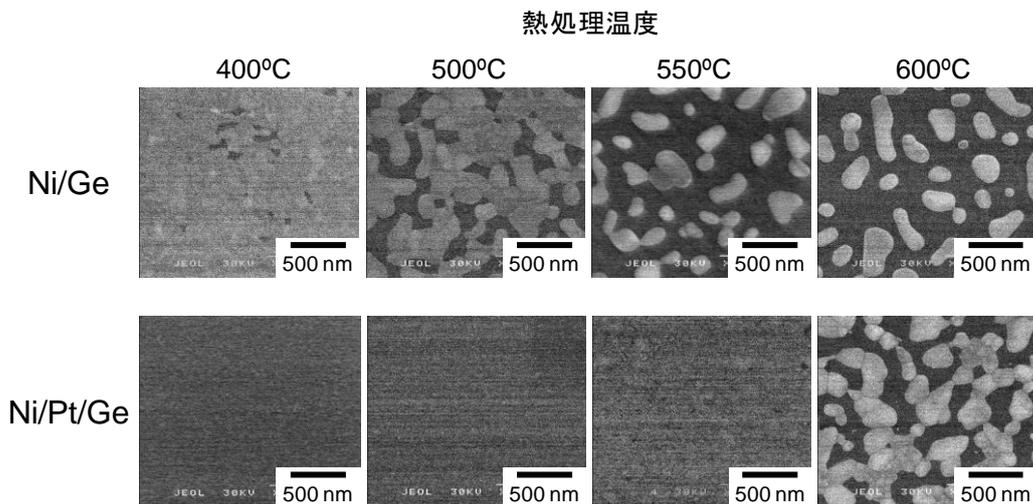


図 1. 400°C~600°C熱処理後の Ni/Ge および Ni/Pt/Ge 試料の表面 SEM 像。

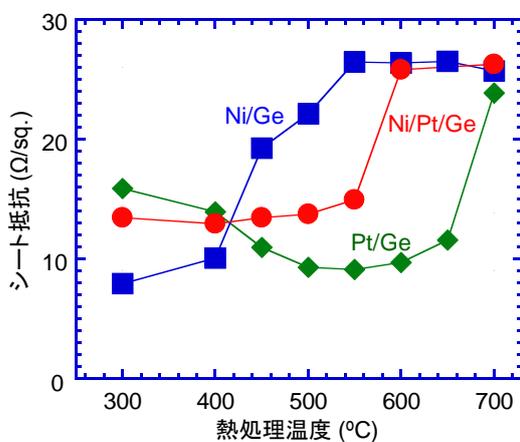


図 2. Ni/Ge、Pt/Ge、および Ni/Pt/Ge 試料のシート抵抗値の熱処理温度依存性。

条件、界面の原子構造などの影響が考えられるが詳細な界面構造評価などが今後の課題として残った。

さらに、300°C、30分間の熱処理によって形成した $(\text{Ni}_{1-x}\text{Pt}_x)\text{Ge}/\text{Ge}$ コンタクトの C-V 測定において、空乏層内の不純物イオン濃度の低下が観察された。同条件で作製した NiGe や PtGe_2/Ge コンタクトにおいては、このような現象は観察されなかった。局所的なエピタキシャル成長が生じている $(\text{Ni}_{1-x}\text{Pt}_x)\text{Ge}/\text{Ge}$ コンタクトにおいて、界面歪などの原因で金属原子の異常拡散や欠陥生成が生じている可能性が示唆された。

(2) 金属/Ge 界面における Schottky 障壁高さの制御

① Ge 表面自然酸化物の影響

金属電極形成前の超高真空中熱処理による Ge 表面自然酸化膜除去が、金属/n型 Ge 界面

電気伝導に与える影響について調べた。Ge 基板表面における自然酸化膜は超高真空装置内の 550°C、20 分間の熱処理によって除去し、Ge (001) 2×1 清浄表面の形成を反射高速電子線回折 (RHEED) 像により確認した。

Er や Zr 等の酸素還元性の強い金属を室温において蒸着した場合、TEM 観察により、酸化膜除去処理の有無に依らず界面反応層が生じることがわかった。また、この時、界面の SBH は酸化膜除去の有無に関わらず 0.51 ~ 0.53 eV の値を示し、フェルミレベルピンニング (FLP) が生じることがわかった。

一方、Ge との反応性の乏しい Pt を室温蒸着した場合、酸化膜除去を行わなかった試料では SBH は 0.49 eV と比較的高い値を示した。また、酸化膜除去処理を施した試料においては、SBH を決定することができないほど大きな界面リーク電流が観察された。これは、Ge の価電子帯端に達する大きな仕事関数 (5.65 eV) を有する Pt/Ge コンタクトにおいて、界面酸化物除去、界面反応抑制によって FLP 解消され、電子に対して極めて大きな SBH が形成された可能性が推測される。大きな界面リーク電流は、正孔に対する低い SBH による多量の少数キャリア注入を示唆するものと考えている。

② 金属/Ge 界面への Si 層挿入の効果

金属 (Er, Zr) /n 型 Ge 界面へ、アモルファス Si (a-Si) あるいはエピタキシャル Si (epi-Si) などの Si 層挿入を行い、電気伝導特性への影響を調べた。図 3 に形成した Er/a-Si/n-Ge コンタクトの断面 TEM 像を示す。Er を室温蒸着した際の Si と Er の界面反応生成物である $\text{Er}_x\text{Si}_{1-x}$ 層が確認できた

Si 層の結晶構造に関わらず、金属の仕事関

数に依存しない、0.50~0.61eVの比較的高いSBHが観測された。特にErを用いた場合には、 $\text{Er}_x\text{Si}_{1-x}$ 層/n-Si界面におけるSBHである0.28eV程度のSBH形成が期待されたが、結果的にFLP解消に対するSi層挿入の効果は見られなかった。FLPが解消されなかった原因として、Si層成膜時に形成されたSi/Ge界面における欠陥準位などがFLPを発生させている可能性が推測される。

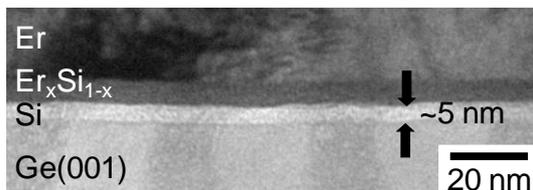


図 3. Er/a-Si(10nm)/epi-Si(0.5nm)/Ge 試料の断面 TEM 像。

③エピタキシャル Mn_5Ge_3 /GeコンタクトにおけるSchottky障壁高さ評価

n型Ge基板上に多結晶またはエピタキシャル Mn_5Ge_3 層を形成し、界面電気伝導特性を調べた。Ge(001)およびGe(111)基板上にMn層を蒸着熱処理した結果、それぞれ多結晶 Mn_5Ge_3 およびエピタキシャル Mn_5Ge_3 が形成されることをXRDおよびTEMにより確認した。

多結晶 Mn_5Ge_3 /Ge(001)接合の場合、フェルミレベルピニングに起因する0.56eV前後の高いSBHが観察された。一方、エピタキシャル/Ge(111)接合におけるI-V特性からは、0.30eV程度の低いSBHを流れる電気伝導が観測された。しかし、C-V測定においてはGe(001)基板、Ge(111)基板によらず、0.63~0.72eVと高いSBHが評価された。これらの結果から、エピタキシャルジャーマナイド/Ge接合においては、局所的に形成された低SBHの領域を優先的に電流が流れていることが示唆される。結論として、エピタキシャルジャーマナイド/GeコンタクトがFLP解消に効果がある可能性が示された。

以上の結果より、金属/Ge界面においては、Si系のコンタクトに比較して強いFLPが生じ、種々の界面制御を施した場合もSBHの変調が極めて困難であることが示された。これは、Ge中において空孔が形成されやすいこと、またGe中の空孔準位が $E_V+0.11\text{eV}$ と比較的浅いため、容易に界面準位を形成することに起因していると考えている。しかし、Pt/Ge系や Mn_5Ge_3 /Ge系コンタクトの結果で見られたように、界面反応を極力抑える、あるいはエピタキシャルジャーマナイド/Ge界面のような

well-definedされた界面を形成することで、FLPを解消できる可能性が示唆された。今後、界面構造の詳細評価と界面制御技術の構築によって、低抵抗な低SBH形成に向けたコンタクト形成技術の確立が期待される。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

① O. Nakatsuka, S. Akimoto, T. Nishimura, and S. Zaima, "Influence of Interfacial Structure on Electrical Properties of Metal/Ge Schottky Contacts" The 9th International Workshop on Junction Technology 2009, June 11-12, 2009, Kyoto, Japan.

② 中塚理, 酒井朗, 財満鎮明, "金属シリサイド・ジャーマナイド/半導体コンタクトの界面構造および電子物性制御 (招待講演)", 第69回応用物理学会学術講演会, 4p-ZB-8, 2008年9月2~5日,

③ O. Nakatsuka, A. Suzuki, A. Sakai, M. Ogawa, and S. Zaima, "Impact of Pt Incorporation on Thermal Stability of NiGe Layers on Ge(001) Substrates", 7th International Workshop on Junction Technology 2007, pp. 87-88, Kyoto, Japan, June 8-9, 2007.

④ 鈴木敦之, 中塚理, 酒井朗, 小川正毅, 財満鎮明, "Ge(001)基板上NiGe薄膜のPt添加による熱的安定性向上", 第54回応用物理学関係連合講演会, 29a-SM-5, 2007年3月27日~30日, 青山学院大学.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: ジャーマナイド薄膜、ジャーマナイド薄膜の作成方法、ジャーマナイド薄膜を備えたゲルマニウム構造体

発明者: 中塚理、酒井朗、鈴木敦之、小川正毅、財満鎮明

権利者: 国立大学法人名古屋大学

種類: 特許

番号: 特願2007-247138

出願年月日: 2007年9月25日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://alice.xtal.nagoya-u.ac.jp/~nakatuka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中塚 理 (NAKATSUKA OSAMU)

名古屋大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 20334998