

シリコン・カーボン混晶薄膜の電気伝導特性に関する研究

山梨大学大学院・医学工学総合研究部 有元圭介
 東北大学・金属材料研究所 宇佐美徳隆

1. はじめに

電子部品で広く用いられている相補型電界効果トランジスタ (CMOS) の高性能化・低消費電力化を実現するためには、チャンネル部における正孔移動度の向上が必要である。有効質量の面方位・歪み量依存性の計算結果から、(100)面上に形成した圧縮歪み薄膜か、(110)面上に形成した伸長歪み薄膜で正孔移動度の大幅な向上が期待できることが期待される。これらの構造を実現する方法として、我々は $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 混晶を用いる方法を提案している。すなわち、Si より格子定数が小さい歪み緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 混晶を Si(100)基板上に形成し、応力印加バッファ層として用いることによって前者の構造を実現でき、歪み $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 混晶を Si(110)基板上に形成することによって後者の構造を実現できる。しかしながら、いずれの構造についても高品質薄膜形成法が確立されていない。そこで我々は、これらの構造の結晶成長における結晶欠陥形成過程を明らかにし、電気伝導特性を明らかにすることを目的として研究を行っている。

2. 研究経過

$\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ の結晶成長においては、3C-SiC 相の析出など、転位の形成を伴わない歪み緩和プロセスも報告されており、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 系ヘテロ構造を形成するには、まず結晶成長中の欠陥形成過程について調べる必要がある。本研究では、ガスソース分子線エピタキシー (MBE) 法による結晶成長において基板温度が欠陥形成過程に及ぼす影響について調べた。結晶欠陥・歪み率の評価には TEM および X 線回折法・ラマン分光法を用いた。電気伝導特性評価については p 型 MOSFET の作製を進めている段階である。

3. 研究成果

ガスソース MBE 法を用いて Si(100)基板および Si(110)基板上に $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層を形成した。原料ガスとしてトリメチルシランとジシランを用いた。図 1 に、Si(100)基板上に 500~600°C で結晶成長した $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ の X 線逆格子マップを示す。500°C では、Si 基板と $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の面内格子定数が整合しているが、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ のピークが ω 軸方向に若干広がっており、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層内の一部の領域のみが歪み緩和を起こしていることが分かる。550°C で成長した試料では、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の大部分で歪み緩和が起きていることが分かる。また、一部 Si 基板と格子整合している領域が確認されるが、この領域では歪み緩和領域よりも格子位置炭素組成が低下していることが分かった。炭素組成の低下は 3C-SiC 相の析出によるものと考えられる。このことから、この試料では 3C-SiC 相の析出と転位の導入が同時に起こっていると考えられ、炭素組成が低下していない領域のみが歪み緩和していると推測される。600°C で成長した試料では、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の歪み緩和が起こらず、3C-SiC 相の析出に伴う格子位置炭素組成の低下とピークの拡散が見られる。これは、600°C 以上の高温では臨界膜厚に達する前に格子位置炭素組成の低下が起こり、転位形成の駆動力が低下するためと考えられる。500°C 以下の温度では単結晶 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ の存在を示すデータは得られなかった。

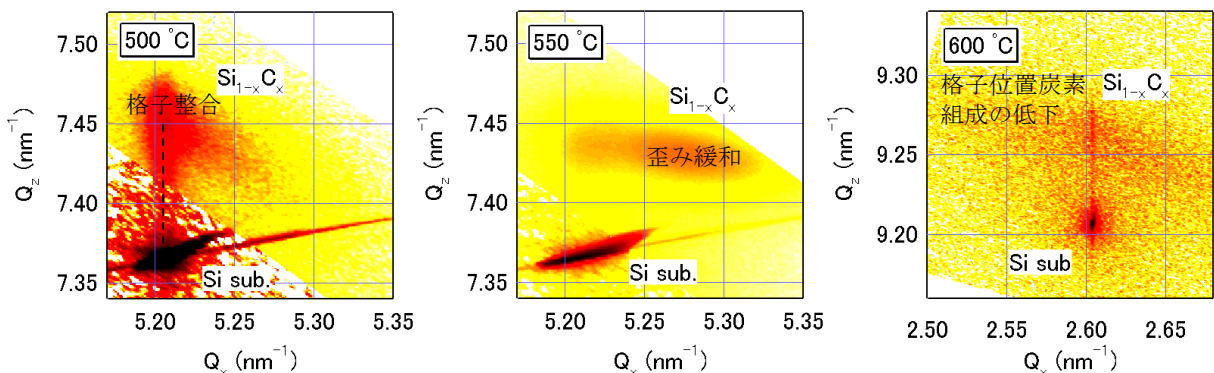


図 1 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(100)$ の X 線逆格子マップ
 500°C・550°C : 224 mapping
 600°C : 115 mapping

図 2 に、Si(100)基板および Si(110)基板（ただし表面は[001]方向に 5° 傾斜している）上に結晶成長した試料の断面 TEM 像を示す。Si(100)基板上の試料では多数の転位が形成されている。この結果は、図 1 で完全な歪み緩和が観測されていることと合致している。転位は膜内全体に分布しており、炭素組成が低下した領域では歪み緩和が起こっていないという X 線回折測定の結果を説明するためには更に検討が必要である。一方、Si(110)基板上への結晶成長を 500°C から 600°C の基板温度において行ったが、いずれの基板温度においても単結晶を得ることができず、図 2（右）に示すような多結晶が得られた。X 線回折では $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層からの回折をとらえることができず、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層全体にわたって Si 基板とは異なる結晶方位を持っていることが分かった。SiGe の場合にはこのような現象は見られない。炭素原子の存在や膜内応力が結晶成長に大きく影響していることが示唆される。今後、炭素組成を変えて結晶成長を行い、詳細を調べる予定である。

Si(100)基板上の試料に関して、緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層上への圧縮歪み Si 薄膜の形成を試みた。図 3 は、550°C で成長した試料のラマンスペクトルである。シリコン基板のピークの高ラマンシフト側にピークが見られる。このピークは、歪み率が -0.6~-0.7% の圧縮歪み Si 層が形成されていることを示している。この歪み率は、正孔密度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下の領域で従来の 2 倍の正孔移動度を実現できると期待される値である。また、AFM 測定から見積もられた RMS 値は 1 nm 以下であり、表面の平坦性も良好であった。しかしながら貫通転位密度が高いことは移動度を劣化させる恐れがあり、今後貫通転位密度の低減を目指した研究を行う予定である。

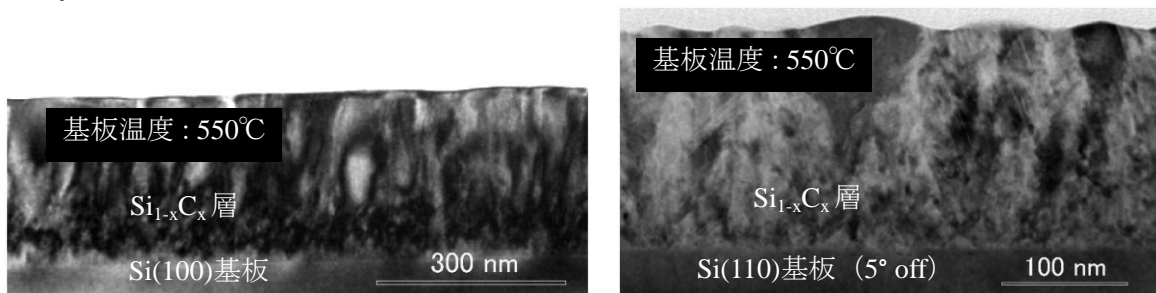


図 2 断面 TEM 像

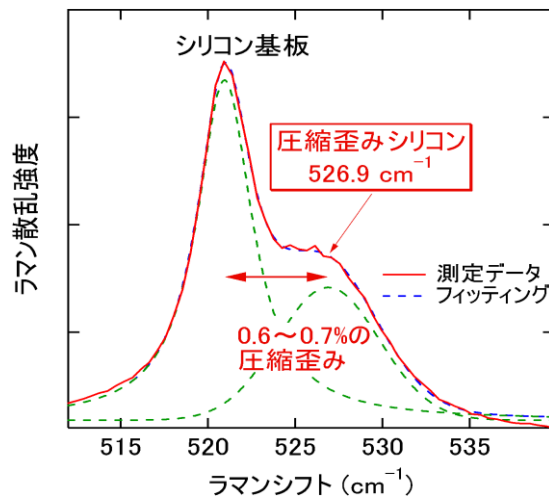


図 3 圧縮歪み Si/Si_{1-x}C_x/Si(100)のラマンスペクトル（基板温度：550°C）

4. まとめ

Si(100)基板及び Si(110)傾斜基板への $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ の結晶成長をガスソース MBE 法を用いて行い、結晶成長条件と膜質との関係を調べた。Si(100)基板上の試料に関しては、成長温度を最適化することにより歪み緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層を形成に成功した。更に、最表面に圧縮歪み Si 層を形成することにも成功した。しかしながら、貫通転位密度が高いことが課題として残り、今後貫通転位の低減を実現する必要がある。一方、Si(110)傾斜基板上に成長した $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 膜はいずれの成長温度でも多結晶であった。原因として炭素原子の存在と膜内応力の影響が考えられる。今後、炭素組成依存性を系統的に調べ、この現象の原因の解明と単結晶薄膜の実現を目指す。

研究課題名 Si(111)基板上への一軸歪み Ge チャンネル形成と結晶性評価

研究代表者名

東京都市大学・総合研究所・澤野 憲太郎

研究分担者名

東京都市大学・総合研究所・星裕介、那須賢太郎
東北大学・金属材料研究所・宇佐美德隆

1. はじめに

シリコン LSI はこれまで微細化により飛躍的な発展を遂げてきたが、その基本素子である Si-MOSFET において、微細化による性能向上に限界が訪れており、この問題解決のために様々な研究が進められている。我々はその中で、チャンネルエンジニアリング、すなわち MOSFET のチャンネル部分を流れるキャリアの移動度向上を目指した技術開発に焦点を絞った。本研究では、電子、正孔ともに Si よりも移動度が高い、ゲルマニウム (Ge) をチャンネル材料として導入した。Ge においては、従来 Si-MOS で用いられてきた(100)面方位基板ではなく、(111)基板を導入することで、より高い電子移動度の実現が見込めることから、Si(111)基板上の Ge(111)チャンネル形成を目指した。これまでに Ge(111)基板を用いた報告はあるものの、集積化に重要となる Si 基板上 Ge 形成技術の開発はほとんど進んでいない。Si と Ge は格子不整合が大きいので、転位などの欠陥発生を抑制することが重要であり、そのためにはまず高品質 SiGe バッファ層形成がキーとなる。しかしながら、Si(111)上への SiGe の結晶成長に関する報告例も非常に少なく、本研究において初めてそれらを系統的に調べることにより、その高品質化を目指した。

さらに Ge に結晶歪み、特に面内非対称な一軸性歪み、を導入することで、電子正孔ともにバルクを超える高い移動度を実現できることが分かっており、本研究ではこの歪みの効果の同時に取り入れた。そのために、上記高品質 SiGe バッファ層に、「選択的イオン注入法」を適用した。これは我々が最近開発を進めている手法であり、SiGe ヘテロ構造に安定な一軸性歪みを導入する唯一のものであり、これによって、超高速 CMOS に向けた新規チャンネルとして、「一軸歪み Ge(111)チャンネル」の世界で初めての実現を目指した。

2. 研究経過

まずガスソース MBE による Si(111)基板上の SiGe バッファ層、および Ge 層の成長について、成長温度、ソースガス流量比などの成長パラメータを調べた。

続いて、一軸歪み Ge(111)チャンネル形成に向けて、我々が独自に開発したイオン注入法を初めて(111)基板に適用した。すなわち、Si(111)基板へイオン注入を施し、それによる欠陥導入によって上に成長させる SiGe 層の歪み緩和の大幅な促進を目指した。さらにこれを応用し、一軸歪みを得るための選択的イオン注入についての検討も行った。イオン注入をストライプパターン状に施すことで、SiGe(111)の局所的な歪み制御を試みた。

歪み Ge の成長については、一般に、Ge 層の歪み緩和を抑制するために、極力成長温度を低温化することが必須である。ガスソース成長において、成長温度を低下させると、成長レートが著しく低下してしまうことから、最適な成長温度を特定することが非常に重要となる。そのため、まず(100)基板において条件の確立を試みた。

3. 研究成果

成長パラメータについて調べた結果、Si(111)基板上においては、Si(100)基板上と比較して、成長レートが遅くなる傾向にあることが分かり、成長温度を高くする必要があることが分かった。その上で形成した SiGe 層の評価を進め、Si(100)上と比べ、積層欠陥などの面欠陥を伴う歪み緩和が生じることを明らかにした。表面モフォロジーは、通常 Si(100)上の成長で生じるクロスハッチパターンが現れず、(111)すべり面

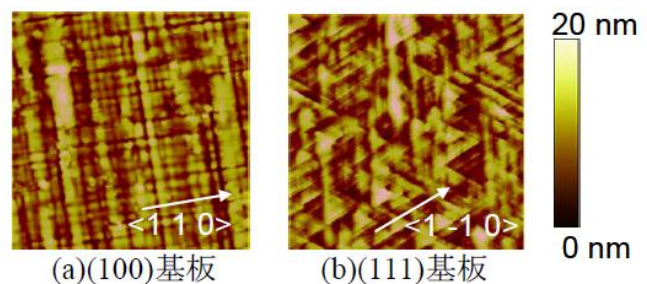


図1 Si 基板上 SiGe 層の表面モフォロジー (10×10 μm²)

に対応した三角形のラフネスとなるのが分かった(図1)。最適な成長条件において、表面ラフネスを数nmに抑制させることができた。

続いて、イオン注入法の適用を行った。まず、Siイオン注入を注入エネルギー25keV、注入ドーズ量 $3 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ から $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ で行った。イオン注入後、基板表面のアモルファス化した領域の結晶性を回復させるため、窒素雰囲気中700°C、10分間アニールを行った。この基板に、膜

厚100nm、各Ge組成のSiGe層を結晶成長させた。その後、SiGe層の歪み緩和を促進させるため、窒素雰囲気中900°C、1時間アニールを行った。SiGe層の緩和率はX線回折法(XRD)とラマン分光法から求めた。図2に緩和率と表面ラフネスの、Si(111)基板へのイオン注入ドーズ量依存性を示す。両者ともドーズ量に強く依存することが分かる。 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 程度のドーズ量を境に急激に歪み緩和率が上昇し、イオン注入により導入された欠陥が歪み緩和に大きく寄与することが示されるとともに、表面ラフネスは低い値を維持しており、最適なドーズ量であることを示す。これらの結果は、これまでに(100)基板上に確立してきたイオン注入法が、(111)基板においても非常に有効であることを示している。

これらの結果をもとに、続いて選択的イオン注入法の適用を試みた。ストライプ状にイオン注入を施したSi(111)基板上にSiGeを成長させ、上記イオン注入法と同様のプロセスにより、歪み緩和させた。歪みの分布をラマンマッピングにより調べた(図3)。歪みの緩和がイオン注入した領域のみに生じており、パターン通りの歪み制御が成功していることが示された。これまでに、Si(100)基板上の研究において、ストライプ状に歪み分布が生じたとき、その歪み状態が一軸性に変化することを示しており(K. Sawano et al., Appl. Phys. Express 1, 121401 (2008))、すなわち、ここで形成されたSi(111)基板上の構造においても、一軸性の歪みが達成されていることを強く示唆している。詳細な歪み状態評価はX線回折を用いて進める必要がある。

Si上のGe層形成に関しては、450°Cでのガスソース成長により、非常に高品質なGe層が形成されることを見出した。実際に歪みGeチャネルデバイスを作製し、移動度評価(移動度スペクトル解析)を行ったところ、正孔移動度として、世界最高値となる、 $3220 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を得た。これはガスソースでの歪みGeチャネル形成が非常に有効であることを示しており、今後(111)基板上への成長を進めていく。

4. まとめ

「一軸歪みGe(111)チャネル」の実現を目指し、Si(111)基板上のSiGeおよびGe膜の結晶成長、結晶性について調べ、歪み制御技術としてイオン注入法の適用、さらに選択的イオン注入法への応用を試み、以下の結果を得た。

- ① Si(100)に比べSi(111)上へのSiGe成長では、成長レートが遅く高温成長が必要であるとともに、積層欠陥等の面欠陥の抑制が重要となることが分かった。
- ② Si(111)基板へのイオン注入により、上のSiGe層の歪み緩和を促進させることが可能であることを示した。この時、最適な条件(ドーズ量 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 程度)では表面ラフネスの増加も抑制できる。
- ③ 選択的イオン注入法により、SiGe(111)面内での歪み分布制御ができることを示した。これは一軸性の歪み状態を有することを示唆する。
- ④ ガスソース成長の条件最適化により歪みGe層の成長が可能であり、正孔移動度として、世界最高値となる、 $3220 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を得た。

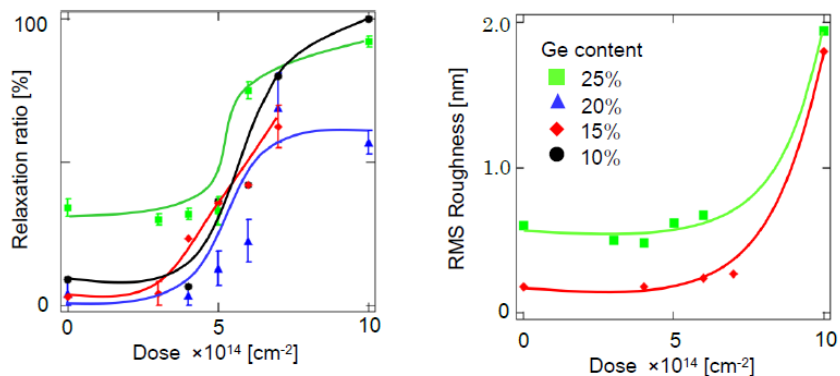


図2 各Ge組成のSiGe/Si(111)構造の緩和率(左)と表面ラフネス(右)の注入ドーズ量依存性

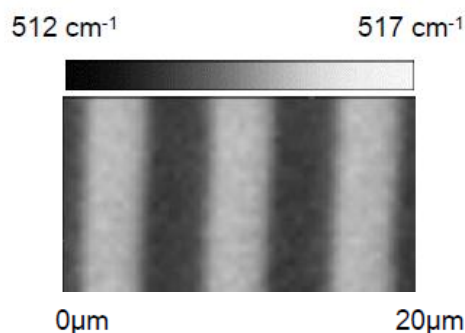


図3 選択イオン注入法により作製したSiGe/Si(111)構造のラマンマッピング像