

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：33924

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760031

研究課題名(和文) 極微コンタクトにおける金属シリサイド初期形成素過程のその場STM観察

研究課題名(英文) In-situ scanning tunneling microscopy of initial formation process of metal silicide

研究代表者

神岡 武文(Kamioka, Takefumi)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：00434332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケールSiトランジスタにおける数十ナノメートル級の金属電極形成に関する学理構築を目的とし、金属イオン照射によるシリコン表面改質の素過程を原子論的スケールで調査した。イオン銃と走査型トンネル顕微鏡の複合装置を用いて、シリコン表面に対するニッケルイオン照射過程をその場かつ実時間で観察する技術を構築し、初期シリサイド化が空孔型欠陥の近傍で促進されることを明らかにした。また、同観察技術を立体シリコン構造にも応用し、低エネルギーのイオン衝突により誘起される表面ラフネスをその場で評価する手法を提案および実証した。

研究成果の概要(英文)：In this project, the interaction of low-energy metal ions with silicon (Si) crystalline surface was investigated in atomistic scale. In-situ real-time observation of Si surfaces modified with nickel (Ni) ions was performed by using our original ion gun and scanning tunneling microscopy (IG/STM) combined system. The snapshots of Ni ion irradiation process onto Si(111) surfaces revealed the initial formation processes of Ni silicide; Ni silicide selectively nucleates not only at the step edges, but also the peripheries of vacancy clusters formed by the ion irradiation. This indicates a strong interaction between Ni atoms and vacancy-type defects. We also demonstrated for the first time in-situ observation of the shadowing effect during ion irradiation on a wire-patterned Si surface. The STM images clearly showed the boundary between the irradiated and the unirradiated region formed by the wire-structure. This new method can be applied to monitor roughness evolution in atomistic scale.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料物性

キーワード：シリコン ニッケル 走査型トンネル顕微鏡 イオン銃 シリサイド 欠陥 核形成

1. 研究開始当初の背景

高性能化および低消費電力化のための Si CMOS スケーリングを阻む要因の一つとして、ソース/ドレイン電極と拡散 Si 層とのコンタクト面積の縮小にともなう接触抵抗値増大の問題が懸念されている。その解決策として、金属/半導体界面のショットキー障壁高さを低くする観点から、金属シリサイドを電極材料に用いたデバイスの研究開発が急速に進んでいる。中でも、低い接触抵抗、急峻な接合形成などの利点から、Ni シリサイド (Ni₃Si₂) が注目され、実デバイスへの適用も始まっている。しかし、Ni シリサイドを所望の領域にのみ作り込む技術はまだ完全ではない。現在、Ni シリサイドの成長を制御する有力な手法の一つとして、イオン注入欠陥を利用したプロセスが提案されている。これは、欠陥領域への優先的なシリサイド成長現象を利用したものだが、一方で、そのような注入欠陥は Ni シリサイド/Si 界面のラフネス増大の原因となる可能性が指摘されている。したがって、今後、さらなる微細化や、ナノワイヤなどの立体構造デバイスで求められる 10nm 以下級のナノコンタクト形成を実現するためには、イオン注入欠陥が存在する場合の Ni シリサイドの核形成・成長メカニズムを原子レベルで理解することが重要である。

Ni シリサイドの成長メカニズムを原子的スケールで解明する研究は進んでいる。例として、Ni シリサイド/Si 界面において、{111} ファセットを維持しながら成長する様子の透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察や、蒸着による Ni と Si 表面との初期反応過程の走査型トンネル顕微鏡 (STM) 観察などの報告はある。しかし、イオン注入欠陥がある場合の Ni シリサイド形成過程をその場で観察した研究は皆無である。Ni シリサイド/Si 界面に {111} ファセットを有するピット状の構造が形成される要因として、基板中に残留するイオン注入欠陥が関わっているとの可能性が指摘されているが、直接的な証拠とはなっていない。この解明のためには、イオン注入欠陥を観察しているその場で、Ni がどこに析出し、その後 Ni シリサイド成長の核として働くかを観察する必要があり、ここに本研究の目的がある。

これに関し、我々は、イオン注入欠陥と金属原子との相互作用をその場観察する技術を立ち上げてきた。この技術は、熱処理中の基板表面を観察できる STM と、その表面近傍に金属イオンを注入できるイオン銃とを組み合わせた独自の装置 (T. Kamioka ら、Rev. Sci. Instrum. **79** (2008) 073707) により実現され、イオン注入された基板表面の変化を、原子的スケールで、その場かつリアルタイムに観察できるものである。この技術を Ni に応用すれば、イオン注入欠陥と Ni との相互作用を、原子的スケールで直接観察できると期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、イオン注入欠陥が存在する状況での Ni シリサイドの初期形成素過程の原子論的描像を明らかにし、ナノコンタクト形成の指針を得るための研究を行う。具体的には、Ni イオン照射による Si 表面の改質素過程を原子的スケールで明らかにする。また、予め P イオン注入した場合の、Ni イオン照射による Si 表面改質素過程を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は、主として我々が開発してきたイオン銃と STM の複合装置 (IG/STM) を用いて行った。この装置は、高温観察可能な STM と、低加速エネルギーの金属イオンを注入可能なイオン銃を組み合わせたものである (図 1)。試料観察室において、イオン銃と STM 探針が試料表面に対向している。STM 観察領域に、確実にかつ短時間でイオンビームを照準するため、吸収電流像取得ユニットと仮標的を組み合わせた照準システムを備えている。これにより、試料非破壊でのイオンビーム照準を可能にしている。特長として、イオンビーム照射前後で、原子的スケールで同一の観察領域を保持できることが挙げられ、イオン照射前後のわずかな変化の違いでも、画像の差分により見分けられる。

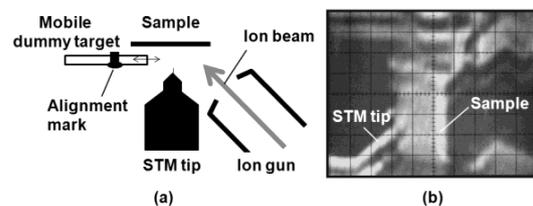


図 1 (左) イオン銃と走査型トンネル顕微鏡の複合装置の模式図。(右) STM 探針と試料の領域を吸収電流像で可視化したもの。

Ni イオン照射による Si 表面改質素過程の観察には、試料として n 型 Si (111) 基板を用いた。この試料を超高真空中で熱処理し、原子的スケールで平坦な表面を準備したのち、STM 観察を開始した。基板温度は 500 °C とし、観察の途中で 5 keV の加速エネルギーで Ni イオンを照射し、引き続き観察を継続した。これにより、イオン照射により表面で生じる変化を観察し、取得像の詳細な解析からシリサイドの核形成および成長メカニズムを考察した。

また、当初の研究目的から発展した実験も行った。これは、平坦な Si 表面ではなく、立体 Si 構造の試料に対してのイオン照射効果を調査したものである。Si (111) 基板にワイヤ状の立体 Si 構造を形成し、STM 観察を試みるとともに、P イオン照射による表面改質を行った。これにより、立体 Si 構造に対して問題が指摘されている、いわゆる「シャドウ効果」を直接評価する手法の実証を試みた。

4. 研究成果

(1) Ni シリサイドの初期核形成素過程に関する研究

Ni シリサイドの初期核形成素過程を調査するため、Si(111)7x7 表面に対する Ni イオン照射過程のその場リアルタイム STM 観察を行った (図 2)。イオン照射前の表面は、ステップとテラスとが交互に並び、テラス全体は 7x7 再構成構造で覆われている。この次の像を取得中に、5 keV の Ni イオンを照射し、引き続き観察を行った。イオン照射中は荷電粒子が STM 探針にあたり、フィードバックにより探針が表面から離れてしまうため、表面の観察はできていない。しかし、イオン照射直後から、再び表面の観察ができています。イオン照射後には、表面に凹状の構造が形成されること、また、ステップ端が後退かつ乱雑化すること、がわかった。このような表面への空孔型欠陥が供給される描像としては、イオン衝突による表面原子のスパッタ、および、イオン注入により基板内部に生成された点欠陥 (空孔) の表面への拡散、が考えられる。

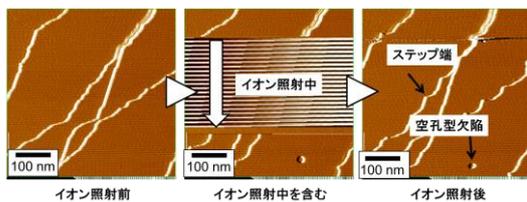


図 2 Si(111) 表面への Ni イオン照射過程のその場リアルタイム観察により得られた連続 STM 像 (基板温度 500 °C、イオン加速エネルギー 5 keV)。

これらのイオン照射により表面に誘起される構造変化をより高解像度で観察したところ、図 3 に示すような Ni 関与の構造 (シリサイド) が確認された。このようなイオン照射誘起の Ni シリサイドの核形成場所は、ステップ端、および、表面空孔が二次元的に凝集した空孔アイランドの周縁部に選択的に見られた。両方とも等価な幾何形状で、未結合手が多く存在する部位であり、シリサイド化が空孔型欠陥の近傍で促進されることを示している。

また、Ni シリサイドの核形成・成長メカニズムに関して解析を進めた。本研究における Ni イオン注入量は非常に少なく、かつ、観察されるシリサイドはステップ端や空孔アイランド周縁部など局所的に形成されるため、従来の表面分析手法では組成分析が困難である。そこで、空孔アイランドの周縁部にシリサイドが核形成するというモデルを仮定し、関与した Ni 原子数を STM 像から見積もった。解析の結果、少なくとも Ni 組成比の大きなシリサイドであること、および、周縁部からシリサイドが成長したことが示唆された。

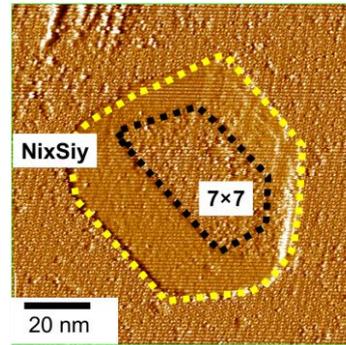


図 3 Ni イオン照射により Si(111)7x7 表面の空孔型欠陥の周縁部に核形成された Ni シリサイド。

本研究により、Ni シリサイドの核形成および成長過程を、原子的スケール、かつ実空間で直接観察し、解析ができるようになってきた。しかし、Ni を引き出すためのイオン源の寿命や安定性、および、STM 探針直下にビームを照準する技術などに改善の余地があり、現時点ではまだ実験効率が低い。基板面方位依存性や、事前の P イオン照射による基板中の残留欠陥がシリサイド化に与える影響の調査などが、今後の課題である。

(2) 立体 Si 構造に対するイオン照射効果に関する研究

ナノスケールの金属電極形成技術が想定される立体構造デバイスでは、ドーパントの導入方法としてイオン注入法が用いられている。しかし、集積度を高めると、立体構造の影が隣接構造にまで到達し、イオンが照射されない領域が生じる「シャドー効果」が問題となる。立体構造デバイスへのイオン照射は、この他にも、立体構造の角部におけるイオン貫通、縁部の侵食など、多くの問題を抱えており、小型化・集積化がさらに進むと顕在化する可能性がある。

本研究では、シャドー効果を含む、このような立体 Si 構造への金属イオン照射効果を、原子的スケールで直接観察する技術を構築した (図 4)。まず、立体構造デバイスを想定した、大きな段差のある構造に対する STM 観察に取り組んだ。STM 探針を目標とする立体 Si 構造に誘導するための工夫をサンプル上に施すと同時に、観察直前に適切な熱処理を行うことで、幅 1 μm 、高さ 200 nm の立体 Si 構造の観察に成功した (図 5)。

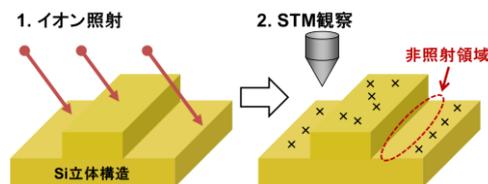


図 4 「シャドー効果」のその場観察の概念図。立体 Si 構造の観察技術、イオン照射のその場観察技術、を組み合わせる。

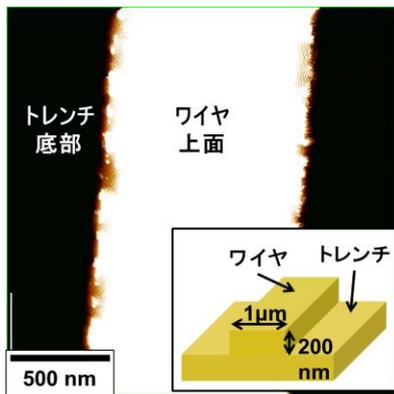


図5 立体 Si 構造 (ワイヤ) の STM 像。適切な観察前の熱処理、および、立体構造を見付け出す工夫により、立体構造観察技術を構築した。

さらに、この立体 Si 構造型試料に対してイオンを照射し、凸型部分の影となってイオンが遮られるシャドウ効果のその場 STM 観察に世界で初めて成功した。図6は、室温にて P イオンが照射された Si 表面の STM 像である。イオンは基板表面の法線から 45 度傾いて、5 keV の加速エネルギーで照射されている。立体 Si 構造の近傍に、イオンが照射された領域とされない領域の境界線を明瞭に観察することに成功した。この境界線は立体 Si 構造のエッジ形状を反映していること、および、非照射領域の幅がイオン入射角度でほぼ説明できることがわかった。

この結果は、低エネルギーのイオン衝突により誘起される Si 表面ラフネスを、その場で評価する手法として応用できる。とくに、イオン照射および非照射領域を同一視野内で観察できるため、ラフネス評価の高精度化に繋がると考えられる。これまでは、原子的スケール、かつ同一領域のラフネス変化は、シミュレーションによる研究でのみ報告されていたが、今回の手法は、それを実験で再現できるものとして展開できると考えている。また、現在 3 次元化の進む実プロセスとの観点から言えば、プラズマダメージの評価、あるいは、シリサイド核形成のデバイス位置依存性の調査にも繋がれると考えている。

(3) 総括

当初の目的のうち、1 つ目の Ni イオン照射のみによるシリサイド初期核形成の素過程の解明はある程度達成されたが、2 つ目の予め P イオン照射した効果の解明は、実験装置の不具合、実験効率の悪さもあり進まなかった。今後引き続き進める予定である。一方、立体 Si 構造へのイオン照射効果の観察という、本研究で用いた技術の予想を超えた発展があり、原子的スケール評価技術の提案に繋がることができた。

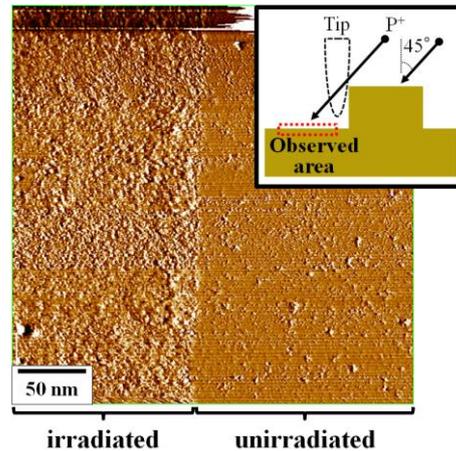


図6 イオン照射/非照射の境界領域の STM 像。像の左側はイオン照射され、ラフネスが増加している。右側は立体 Si 構造の影となりイオンが入射せず、全面に Si (111)7x7 構造を保持している。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① K. Mura, **T. Kamioka**, T. Kitani, K. Imazu, T. Watanabe, "Real-time scanning tunneling microscopy observation of Ni ion irradiation process on Si(111) surfaces", 12th international conference on atomically controlled surfaces, interfaces and nanostructures, in conjunction with 21st international colloquium on scanning probe microscopy, 4-8th Nov. 2013, Ibaraki, Japan.
- ② 武良 光太郎, **神岡 武文**, 木谷 哲, 今津研太, 渡邊 孝信, "Si(111) 表面への Ni イオン照射過程のリアルタイム STM 観察", 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 16-20 日, 京都, 日本.
- ③ F. Isono, **T. Kamioka**, Y. Kawamura, Y. Shikahama, H. Yamashita, K. Yamada, K. Mura, H. Kosugiyama, S. Hashimoto, T. Watanabe, "In-situ scanning tunneling microscopy of shadowing effects of angled ion implantation on patterned Si surface", The 34th International Symposium on Dry Process, 15-16th Nov. 2012, Tokyo, Japan.
- ④ 武良 光太郎, **神岡 武文**, 磯野 文哉, 川村 祐士, 鹿浜 康寛, 山下 広樹, 山田 康平, 小杉山 洋希, 橋本 修一郎, 渡邊 孝信, "シャドウイング効果を利用した低エネルギーイオン誘起損傷のその場 STM 観察", 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 27-30 日, 神奈川, 日本.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神岡 武文 (KAMIOKA Takefumi)

豊田工業大学・PD 研究員

研究者番号：00434332