

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289097

研究課題名(和文) 拡散メカニズム解析に基づく3次元トランジスタ局所領域におけるドーパント分布制御

研究課題名(英文) Dopant diffusion paths in polycrystalline silicon gate of three-dimensional metal-oxide-semiconductor field effect transistor investigated by atom probe tomography

研究代表者

井上 耕治 (Inoue, Koji)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：50344718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：次世代3次元構造トランジスタの特定の微細領域におけるドーパント拡散過程を明らかにするために、最新のUVレーザー型3次元アトムプローブ法を用いて、粒界、粒内、ゲート酸化膜界面を区別してドーパント分布の900℃での熱処理時間依存性を調べた。n-typeトランジスタのゲートドーパントのPとp-typeトランジスタのゲートドーパントのBでメインの拡散メカニズムが異なることが明らかになった。多結晶Siゲート中のPの拡散は粒界拡散が支配的であった。一方、Bは粒界拡散だけではなく粒内拡散も支配的であり、Pの粒界拡散よりもBの拡散のほうが速いこともわかった。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the dopant diffusion path of P and B in n- and p-types polycrystalline (poly-) -Si gates of trench-type three dimensional metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, the annealing time dependence of the dopant distribution at 900 °C were analyzed by atom probe tomography. Remarkable differences between P and B diffusion behavior were observed. P atoms diffuse into deeper regions from the implanted region along grain boundaries in the n-type poly-Si gate. With longer annealing times, segregation of P on the grain boundaries was clearly observed. These results show that P atoms diffuse along grain boundaries much faster than through the bulk. On the other hand, in the p-type poly-Si gate, segregation of B was observed only at the initial stage of diffusion. After further annealing, the B atoms became uniformly distributed, and no clear segregation of B was observed. Therefore, B atoms diffuse not only along the grain boundary but also through the bulk.

研究分野：格子欠陥・ナノ構造分析

キーワード：アトムプローブ 粒界拡散 ドーパント

1. 研究開始当初の背景

1970年代から現在に至るまで、集積回路の高性能化は、基本的にスケーリング則によるMOSFETの微細化によって支えられてきた。しかし、従来のスケーリング則による微細化では、高電流駆動能力と短チャネル効果抑制の両立が困難になってきており、従来型のMOSFET構造とは異なる新規構造(いわゆる3次元構造)デバイスへの展開が進められ、一部は実用化されている。

3次元構造デバイスの最も重要な技術的課題の1つに、3次元構造に由来する複雑な形状の極微細領域におけるドーパントを高精度に制御することが挙げられる。MOSFETの特性は、ゲート・ソース・ドレイン・チャネルなどのドーパント分布で制御されるが、そのドーパント設計は経験的な知見や電気的特性などの実験事実に基づくものであり、3次元構造の局所領域におけるドーパントの正確な分布は未だに分かっていない。その理由は、従来よりドーパント分布の評価に用いられているSIMS法では、深さ方向の分布のみ評価可能であることや(微細MOSFETにとっては大きな)測定面積の点で、3次元構造の微細な領域の評価にはまったく適さないからである。さらに一般に微細MOSFETにおいては、ナノスケールのドーパント分布を制御するために共注入が用いられるが、異種ドーパントが存在したときの拡散機構については未解明であり、その相互作用について把握することは、高性能、高信頼な微細MOSFETを実現するために不可欠である。また多結晶Si膜内での拡散では、結晶粒内及び粒界での拡散を分離して評価する必要がある。しかし、これらを直接的に評価する手法がない。

2. 研究の目的

3次元アトムプローブ(Atom Probe Tomography: APT)法は、原子スケールに近い空間分解能で局所領域における原子1個1個を直接観察することで、元素の3次元実空間分布を得ることのできるユニークな分析手法である。近年、レーザー型APTが開発され半導体材料の測定が可能になった。このAPT法を用いることで、3次元構造でのドーパント分布を原子スケールに近い空間分解能で明らかにするだけでなく、MOSFETの特定の微細領域において、ドーパントがプロセス熱処理によってどのような経路をたどって拡散し再分布していくのか?を段階的に抜き取り評価することで、あたかもスナップショットを見ているかのごとく熱処理によるドーパント再分布過程を見ることができる。複雑な構造のトランジスタの特定の微細領域におけるドーパント拡散過程を明らかにできる。

3. 研究の方法

次世代3次元トランジスタ試料(トレンチ

構造トランジスタ)の多結晶Siゲート中のドーパントの拡散経路について、最新のレーザーパルス型局所電極3次元アトムプローブを用いて調査した。集束イオンビーム加工装置による3次元アトムプローブ用針試料作製方法の検討や3次元アトムプローブの測定条件の最適化などを行った。そして最適化した条件を使用して、トレンチ構造トランジスタの多結晶Siゲート中のドーパント分布を3次元アトムプローブで取得した。3次元アトムプローブ測定で得られる3次元アトムマップは、原子の3次元位置と元素情報を含んでおり、粒界、粒内、酸化膜界面に注目し、プロセス熱処理におけるそれぞれのドーパント分布の変化を調べた。またドーパントの粒界拡散係数を決定しようとした。粒界が針状試料の針先部分に入るように、その試料を集束イオンビーム加工装置を用いて針状に加工し、最適化した測定条件で3次元アトムプローブ測定を行った。取得したアトムマップから特に粒界におけるドーパントの分布を詳細に調べ、粒界における濃度プロファイルを算出し、ドーパントの粒界拡散係数の高精度決定を行った。また共注入した時の異種ドーパント同士の相互作用による拡散係数の変化などについても調査するため、同様の実験を共注入試料においても行った。特に粒界拡散係数の評価は他の手法では困難であるため、共注入によって粒界拡散がエンハンスされるのか?抑制されるのかなど本手法を用いて調査した。

4. 研究成果

トレンチ構造トランジスタの多結晶Siゲート中のドーパントの拡散経路について、最新のレーザーパルス型局所電極3次元アトムプローブを用いて、粒界、粒内、ゲート酸化膜界面を区別してドーパント分布の熱処理依存性を調べた。粒界、粒内、酸化膜界面に注目し、プロセス熱処理におけるそれぞれのドーパント分布の変化を調べることでドーパントの拡散経路を調べた結果、n-typeトランジスタのゲートドーパントのPとp-typeトランジスタのゲートドーパントのBでメインの拡散メカニズムが異なることが明らかになった。Pは多結晶Siの粒界拡散が酸化膜界面拡散や粒内拡散よりも速く、多結晶Siゲート中のPの拡散は粒界拡散が支配的であった。一方、Bは粒界拡散だけではなく粒内拡散も支配的であり、Pの粒界拡散よりもBの拡散のほうが速いこともわかった。またAsの粒界拡散におけるPやBのpre-dopingの効果を調べ、Pをpre-dopingした場合にはAsの粒界拡散は促進され、一方、Bをpre-dopingした場合にはAsの粒界拡散は抑制されることがわかった。

3次元アトムプローブ測定におけるSi中のB分布のレーザーエネルギー依存性についても詳細に調べ、レーザーエネルギーが高い場合には、Si中のB分布にアーティファクト

が生じることがわかった。Si 中の B 分布は、あるレーザーエネルギー以下であれば、アーティファクトが生じないことを明らかにし、Si 中の B の測定におけるレーザーエネルギーの上限を提案した。上述の測定はその条件を満たしており、アーティファクトによるものではないことも確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Y. Tu, H. Takamizawa, B. Han, Y. Shimizu, K. Inoue, T. Toyama, F. Yano, A. Nishida, and Y. Nagai "Influence of laser power on atom probe tomographic analysis of boron distribution in silicon", *Ultramicroscopy*, 査読有, 173, 2017, 58-63.
DOI:10.1016/j.ultramic.2016.11.023

H. Takamizawa, Y. Shimizu, K. Inoue, Y. Nozawa, T. Toyama, F. Yano, M. Inoue, A. Nishida, and Y. Nagai, "Pre-doping effect of boron and phosphorous on arsenic diffusion along grain boundaries in polycrystalline silicon investigated by atom probe tomography", *Applied Physics Express*, 査読有, 9, 2016, 106601.
DOI:10.7567/APEX.9.106601

Y. Kunimune, Y. Shimada, Y. Sakurai, M. Inoue, A. Nishida, B. Han, Y. Tu, H. Takamizawa, Y. Shimizu, K. Inoue, F. Yano, Y. Nagai, T. Katayama, and T. Ide, "Quantitative analysis of hydrogen in SiO₂/SiN/SiO₂ stacks using atom probe tomography", *AIP ADVANCES*, 査読有, 6, 2016, 045121.
DOI:10.1063/1.4948558

Y. Shimizu, H. Takamizawa, K. Inoue, F. Yano, S. Kudo, A. Nishida, T. Toyama, and Y. Nagai, "Impact of carbon co-implantation on boron distribution and activation in silicon studied by atom probe tomography and spreading resistance measurements", *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, 55, 2016, 026501.
DOI:10.7567/JJAP.55.026501

B. Han, H. Takamizawa, Y. Shimizu, K. Inoue, Y. Nagai, F. Yano, Y. Kunimune, M. Inoue, and A. Nishida, "Phosphorus and boron diffusion paths in polycrystalline silicon gate of a trench-type three-dimensional metal-oxide-semiconductor field effect transistor investigated by atom probe

tomography", *Appl. Phys. Lett.* 査読有, 107, 2015, 023506.
DOI:10.1063/1.4926970

[学会発表](計 6 件)

Y. Tu, H. Takamizawa, Y. Shimizu, K. Inoue, T. Toyama, F. Yano, A. Nishida, Y. Nagai, "Influence of high power laser on B distribution in Si obtained by atom probe tomography" *Atom Probe Tomography & Microscopy (APT&M2016)* 2016 年 6 月 12 日-2016 年 6 月 17 日, Gyeongju, South Korea

Y. Shimizu, B. Han, Y. Tu, K. Inoue, Y. Nagai, "atom probe tomographic study of dopant distribution controlling for future silicon nanoelectronics", *Summit of Materials Science 2016*, 2016 年 5 月 18 日-2016 年 5 月 20 日, Sendai

Y. Shimizu, B. Han, Y. Tu, K. Inoue, Y. Nagai, "Elemental distribution in semiconductor-based device structures analyzed by atom probe tomography", *2015 International Symposium for Advanced Materials Research*, 2015 年 8 月 16 日-2015 年 8 月 20 日, Taiwan

Y. Shimizu, K. Inoue, "3D atomic-scale-analysis of elemental distribution in Silicon nanoelectronics", *3rd Bilateral Italy-Japan Seminar Silicon nanoelectronics for advanced applications*, 2015 年 6 月 16 日, Kyoto

K. Inoue, H. Takamizawa, Y. Shimizu, B. Han, Y. Nagai, F. Yano, Y. Kunimune, M. Inoue, A. Nishida, "Dopant drive-in Path analysis in poly-silicon filled in trench type 3D-MOSFET using atom probe tomography", *International conference on solid state devices and materials 2014 (SSDM2014)*, 2014 年 9 月 08 日-2014 年 9 月 11 日, Tsukuba

K. Inoue, "Elemental distribution analysis in Silicon-based semiconductor devices" *Atom Probe Tomography & Microscopy (APT&M2014)* 2014 年 9 月 01 日-2014 年 9 月 5 日, Stuttgart, Germany

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

井上 耕治 (INOUE, Koji)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：50344718

(2)研究分担者

永井 康介 (NAGAI, Yasuyoshi)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：10302209

清水 康雄 (SHIMIZU, Yasuo)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号：40581963