

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560295

研究課題名（和文） MEIS-TOF-ERDA を用いた次世代 MOS プロセス極浅接合評価技術の開発

研究課題名（英文） Development of analysis technique for ultra-shallow junction in next generation MOSFET by MEIS-TOF-ERDA

研究代表者

阿保 智 (ABO SATOSHI)

大阪大学・極限量子科学研究センター・助教

研究者番号：60379310

研究成果の概要（和文）：国際半導体技術ロードマップで要求される極浅接合の評価のため、高エネルギー分解能のトロイダル静電アナライザ (TEA) と飛行時間計測 (TOF) をエネルギー分解と質量分解に用いた弾性反跳粒子検出法 (ERDA) の開発を行った。質量分解と高収量を両立した計測系の構築を行い、ボロン注入量の異なる3種類の標準試料の計測を行い結果の比較を行った。これらの結果より、ロードマップで要求される不純物深さ分解能を MEIS-TOF-ERDA 計測法により達成することを示した。

研究成果の概要（英文）：An elastic recoil detection analysis (ERDA) technique with a toroidal electrostatic analyzer (TEA) for an energy analysis and a time-of-flight (TOF) technique for a mass separation was developed for an analysis of the ultra shallow junction in shrunk semiconductor devices required in the international technology roadmap for semiconductors (ITRS). Three standard samples were measured with the developed medium energy ion scattering (MEIS)-TOF-ERDA system with high mass resolution and high count yield. The results indicate that the depth resolution required in the ITRS can be realized by the developed MEIS-TOF-ERDA.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：半導体工学、イオンビーム工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子・電気材料工学

キーワード：組成分析、飛行時間計測、弾性反跳粒子検出法、Time-of-Flight (TOF)、Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)

## 1. 研究開始当初の背景

シリコン半導体集積回路で使用されるヒ素やボロンなどの不純物元素の深さ分布計測には、SIMS (secondary ion mass

spectroscopy: 二次イオン質量計測法) や TEA (toroidal electrostatic analyzer: トロイダル静電アナライザ) を用いた MEIS (medium energy ion scattering: 中エ

エネルギーイオン散乱法)が用いられていた。また、アニール処理により活性化された不純物の電気伝導特性評価にはシリコン基板上面からの四探針法によるシート抵抗計測が用いられていた。国際半導体技術ロードマップでは、ドレインの拡張領域の深さ( $X_j$ )は2015年には7.3 nmにまで縮小され、このような極浅不純物分布や電気伝導特性をナノメートル以下の分解能で計測する技術の開発が次世代MOSプロセスの接合エンジニアリングには必要不可欠とされていた。しかし、SIMSは破壊型分析法であり数十ナノメートル以上の深い不純物注入では信頼性があるが、スパッタリング率がプローブイオン種や深さによって異なるなどの問題のため、 $X_j$ の計測など極浅不純物注入試料の計測には不向きであり、MEISには、非破壊型分析法であり標準試料が不要などの利点があるが、軽元素では散乱断面積が低下する上、TEAでスキャン中のエネルギーと異なるエネルギーの入射イオンが失われることからボロンなどの軽元素の深さ分布計測には向かない欠点があった。そこで、研究代表者はERDA(elastic recoil detection analysis: 弾性反跳粒子検出法)のエネルギー分析に飛行時間を用いたTOF(time-of-flight)-ERDA計測法による軽元素分析技術の開発を行った(科学研究費補助金(若手研究(B)) 課題番号:19760217 TOF-ERDAを用いた軽元素分析技術の開発 H19-20)。この研究では、集束シリコンプローブを用いたTOF-ERDAでシリコン基板に低エネルギー注入されたボロンを非破壊で検出した。しかし、基板材料であるシリコンの弾性反跳やプローブ自身の前方散乱によるシリコンとボロンの検出結果が重なるため、詳細な深さ分布計測を行うまでには至らなかった。電気伝導特性評価では、研究代表者はSSRM(Scanning Spreading Resistance Microscopy)を用いて四探針法では計測できない低エネルギーのヒ素やボロン注入試料のアニール条件の違いによる局所拡がり抵抗の深さ分布の変化を明らかにしていた。次世代MOSプロセスには、非破壊極浅元素分布測定と電気伝導特性を組み合わせ、半導体技術ロードマップで必要とされる極浅接合の評価技術の開発が必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、シリコン基板に極低エネルギー注入を行ったボロンのスパイクアニールやレーザアニール前後の極浅元素分布測定ならびに電気伝導特性の比較を行い、次世代MOSプロセスのための極浅接合評価技術の確立を目的とし、極浅ボロン分布測定には、TEAをエネルギー分解に、飛行時間を質量分離に用いたERDA計測技術の開発を行った。また、

電気伝導特性評価にはこれまでに研究代表者が行ってきたSSRMを用いた。極浅元素分布計測のためのERDA計測技術開発では、アルゴンおよび窒素イオンプローブを用いて、シリコン中のボロンなどの軽元素の計測を可能にした。エネルギー分析には、従来のERDA計測で用いられてきたSSD(Solid State Detector: 半導体検出器、エネルギー分解能15-20 keV)ではなく、TEAを用いることで、高エネルギー分解能を実現した。しかし、このエネルギー分解能は、試料表面の分解能でありERDA計測では、比較的重いアルゴンまたは窒素イオンプローブを用いるため試料中でのボアのエネルギー拡がりを見逃さず、エネルギー分解能が悪化する。本研究では、反跳角を最適化することでボロンでの深さ分解能1 nm以下を実現した。ERDAでは、基板材料のシリコンや注入したボロンの反跳粒子と前方散乱されるプローブイオンが検出される。このため、エネルギー分析と質量分離を同時に行う必要があり、これまでの研究でのTOF-ERDA計測技術開発ではエネルギーのみしか計測できず詳細な元素分布を得るには至らなかった。そこで本研究では、検出器に到達する反跳粒子または前方散乱粒子の質量分離を飛行時間で行った。また、本研究ではTEAを用いたERDA計測技術開発だけではなく、電気伝導特性評価をSSRMで行いERDA計測結果と電気伝導特性の比較検討を行った。SSRMは、試料中の活性化した不純物による電気特性が計測可能であるが、深さプロファイル計測のためには劈開または研磨のプロセスが必要となる。

本研究では、トロイダル静電アナライザを用いたERDA計測によるボロン元素の極浅プロファイル評価と同様の試料の電気伝導特性評価も相補的に行った。

## 3. 研究の方法

本研究では、シリコン基板に低エネルギー注入された極浅軽元素の分布計測のため、エネルギー分析にTEAを、質量分離に飛行時間を用いたERDA計測法を開発を行った。ERDAは、プローブイオンによって弾性反跳した粒子のエネルギーを計測することで試料の不純物分析を行う手法であり、非破壊で軽元素の計測を標準試料無しに行うことが可能である。本研究では、アルゴンおよび窒素イオンプローブを用いることで、シリコン中のボロン計測を可能にした。また、エネルギー分析には従来のERDA計測で用いられているSSDではなく、TEAを用いることでエネルギー分解能の向上を図った。極浅ボロン注入試料のERDA計測では、シリコンとボロンが弾性反跳粒子として、プローブイオンの前方散乱粒子として同時に検出される。そのため、散乱粒子のエネルギー分析のみではなく質量分離

も行う必要がある。通常の ERDA 計測ではこの重なりをなくすため、プローブイオンと計測対象反跳粒子の物質に対する侵入長の差を用いた DLC(diamond like carbon)などのストップピングホイルで軽元素のみのエネルギースペクトルを計測するが、DLC 通過時に反跳粒子がエネルギーを失うためエネルギー分解能悪化の原因となる。そこで本研究では、試料から検出器までの飛行時間計測で質量分離を行うことでエネルギー分解能の悪化なしに個々の粒子の判別を行った。この手法では、薄膜ストップピングホイルでのエネルギー拡がり起こらないため反跳粒子のエネルギーを正確に計測することが可能となる。電気伝導特性評価では、研究代表者はこれまでに SSRM を用いた極浅注入試料の局所抵抗分布計測を行っており、継続して極浅ボロン注入試料の計測も行った。

本研究は以下の内容に重点を置き、達成した。全ての期間において、MEIS-TOF-ERDA 計測系の構築のみではなくボロン注入試料の電気伝導特性を SSRM で行い、MEIS-TOF-ERDA 計測結果との比較検討を行った。

平成 22 年度

1. 反跳角の最適化
2. TOF 計測系の構築

平成 23 年度

1. ボロン堆積試料計測
2. ボロン注入試料計測

平成 24 年度

1. 時間分解能改善
2. 極浅ボロン注入試料評価

平成 22 年度

1. 反跳角の最適化

これまでに TEA を用いた MEIS 計測技術開発でエネルギー分解能 0.4 keV を実現している。しかし、ERDA 計測では、重いイオンが試料中を通過するためボアのエネルギー拡がりによりエネルギー分解能が 1.3 keV 以上と悪化している。1.3 keV のエネルギー分解能で、深さ分解能 1 nm 以下の実現のため、試料の設置角度と反跳角(TEA 設置角度)の最適化を行った。

2. 飛行時間計測系の構築

飛行時間計測系として、これまでの研究(科学研究費補助金(若手研究(B))と先端計測分析技術・機器開発事業(科学技術振興機構))で使用していた計測系を改良し、TEA 計測系に組み込んだ。本研究では飛行時間計測には、これまでの研究で用いてきた二次電子をスタートシグナルに用いる方法から高電圧高

速パルサーを用いたビームチョッピングによるスタートシグナルに変更し、TEA からの出力をストップシグナルに用いた。TEA の角度情報と TOF 計測結果の統合のため、マルチスケラではなく時間差波高変換器を用いた。この方法では、時間分解能の悪化が予想され、分解能と収量を考慮した最適な飛行時間計測系の構築が必要となった。

平成 23 年度

1. ボロン堆積試料計測

平成 22 年度は、ボロン注入試料を用いて計測系の構築を行った。ボロン注入試料では、深さに対してボロン原子量が増えるため、分解能の評価が難しい、そこでボロン堆積試料を用いた計測系の評価を行った。

2. ボロン注入試料計測

本研究で開発した MEIS-TOF-ERDA 計測系の計測対象であるボロン注入試料の計測を行い、深さ分布計測と散乱粒子の質量分離について評価を行った。

平成 24 年度

1. 時間分解能改善

平成 23 年度のボロン注入試料の評価で、散乱粒子の質量分離について改善が必要と判明したため、ビームチョッピングの最適化を行い、散乱粒子の分離を可能とした。

2. 極浅ボロン注入試料評価

注入条件の異なる 3 種類の極浅ボロン注入試料について深さ分布測定を行い、本研究で開発した計測系の検証を行った。また、計測結果は電気伝導特性評価結果のみではなく、半導体プロセス用のシミュレータとの比較も行った。

4. 研究成果

平成22年度には、最適な反跳角でのERDAシグナルの取得および、TOF計測手法の確立を行った。

1. 反跳角の最適化

100 keVのアルゴンイオンを用いてシリコン中の極浅注入不純物の計測をめざしたが、アルゴンイオンによりスパッタされるシリコンイオンの収量が大きく、エネルギー及び飛行時間分離が困難となったため、プローブイオンを窒素イオンに変更しTEA設置角度の最適化を行った。散乱角を65°とした場合に、個々のイオンの飛行時間差が大きく、また、散乱時のエネルギー差も大

きくなった。

## 2. TOF計測系の構築

本研究でのTOF計測には、パルサーを用いたビームチョッピング法を用いている。スタートシグナルにはパルサーからのトリガシグナルを、ストップシグナルにはTEAからの出力を用いた。散乱角 $65^\circ$ とし、TEAでエネルギースキャンを行いながら、100 keVの窒素イオンでTOF-ERDA計測を行ったところ、 $B^+$ , 2 keV,  $1.5 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 注入試料では、 $B^+$ ,  $B^{2+}$ ,  $Si^+$ のTOF-ERDAシグナルを得た。また、未注入Si基板試料のTOF-ERDA計測では、 $Si^+$ と $H^+$ のTOF-ERDAシグナルを得た。

平成 23 年度は、22 年度に開発を行った MEIS-TOF-ERDA 計測系を用いて、ボロン堆積試料および注入試料の計測を行い、時間分解能の評価とボロン深さ分布計測を行った。

### 1. ボロン堆積試料計測

22 年度にはボロン注入試料で、MEIS-TOF-ERDA 計測系開発を行った。注入試料は計測系の構築には有用であるが、深さ毎にボロン濃度が異なるため分解能評価は難しい。そこで、23 年度には MEIS-TOF-ERDA 計測系の時間分解能評価をボロン堆積試料で行った。ボロン堆積試料は深さによりボロンの有無のみが変化するため計測系評価に有用である。100 keV の窒素もしくはアルゴンイオンで求めた時間分解能は 100 ns 程度で、ボロンとシリコンの分離が可能であった。

### 2. ボロン注入試料計測

ボロン堆積試料計測によりボロンとシリコンの分離可能な時間分解能を達成したため、ボロン注入試料 ( $2 \text{ keV}$ ,  $1.5 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ ) の MEIS-TOF-ERDA 計測を行い、ボロン深さ分布を明らかにした。TOF-ERDA スペクトルでは反跳したボロンとシリコンが分離されていた。また、エネルギーによりボロンとシリコンのスペクトルが互いに交差しており、時間分解能を改善することで深さ分解能が向上することがわかった。

平成 24 年度には、これまでに開発を行った MEIS-TOF-ERDA 計測系の時間分解能の改善と低エネルギーボロン注入標準試料の評価を行った。

### 1. 時間分解能改善

散乱粒子の角度分解を行う位置検出系と質量分離を行う飛行時間計測系の統合を行い、同期計測を行うことで時間分解能の改善

を行った。計測結果より求めた時間分解能は 50 - 100 ns であり、計測試料中のボロン、シリコン、酸素の質量分離に十分な時間分解能を達成した。

### 2. 極浅ボロン注入試料評価

注入エネルギー 2 keV, ドーズ量  $0.5 \times 10^{16}$ ,  $1.0 \times 10^{16}$ ,  $1.5 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2$  の 3 種類の極浅ボロン注入試料のボロン深さ分布を開発した MEIS-TOF-ERDA 計測系で評価した。ドーズ量が  $1.0 \times 10^{16}$ ,  $1.5 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2$  の試料では、高いドーズ量のため試料表面にボロンが偏析していることを明らかとした。また、次世代の半導体プロセスで用いられる程度のドーズ量の  $0.5 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2$  の試料では、深さ分布がシミュレーション (Synopsys Sentaurus TCAD vG-2012.06) と良い一致を示した。

22~24 年度を通じて、SSRM を用いた電気伝導特性評価を行い MEIS-TOF-ERDA 計測結果の妥当性検討を行っている。

これらの結果により、国際半導体技術ロードマップで必要とされている不純物深さ分解能を本研究で開発した MEIS-TOF-ERDA 計測法により達成可能と示した。

### 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 3 件)

1. Satoshi Abo, Naoya Ushigome, Hidenori Osaе, Toshiaki Iwamatsu, Hidekazu Oda, Fujio Wakaya, Mikio Takai, Active Dopant Profiling of Ultra Shallow Junction Annealed with Combination of Spike Lamp and Laser Annealing Processes using Scanning Spreading Resistance Microscopy, Proceedings of the 19th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT 2012) AIP Conference Proceedings 1496, 164-166 (2012). 査読あり
2. Satoshi Abo, Hidemasa Horiuchi, Fujio Wakaya, Gabor Battistig, Tivadar Lohner, Mikio Takai, Time of flight elastic recoil detection analysis with toroidal electrostatic analyzer for ultra shallow dopant profiling, Surface and Interface Analysis 44, 732-735 (2012). 査読あり
3. Satoshi Abo, Kazuhisa Nishikawa, Naoya

Ushigome, Fujio Wakaya, Toshiaki Iwamatsu, Hidekazu Oda, Mikio Takai, Local Resistance Profiling of Ultra Shallow Junction Annealed with Combination of Spike Lamp and Laser Annealing Processes using Scanning Spreading Resistance Microscope, Proceedings of 18th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2010) AIP Conference Proceedings 1321, 229-232 (2010). 査読あり

[学会発表] (計6件)

1. 李沛, 堀内英完, 阿保智, 若家富士男, 高井幹夫, 静電型分析器を用いた TOF-ERDA による極浅原子分布分析技術の開発, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 2012. 9. 11-9. 14, 愛媛大学・松山大学
2. Satoshi Abo, Naoya Ushigome, Hidenori Osaе, Fujio Wakaya, Toshiaki Iwamatsu, Hidekazu Oda, Mikio Takai, Active dopant profiling of ultra shallow junction annealed with combination of spike lamp and laser annealing processes using scanning spreading resistance microscopy, 19th International Conference on Ion Implantation Technology, 2012. 06. 25-06. 29, Valladolid, Spain
3. Satoshi Abo, Hidemasa Horiuchi, Fujio Wakaya, Gabor Battistig, Tivadar Lohner, Mikio Takai, Time of flight elastic recoil detection analysis with toroidal electrostatic analyzer for ultra shallow dopant profiling, 8th International Symposium on Atomic Level Characterization for New Materials and Devices ' 11, 2011. 5. 22-5. 27, Seoul, Republic of Korea
4. 堀内英完, 阿保智, 若家富士男, 高井幹夫, TEA を用いた TOF-ERDA による極浅原子分析法の開発研究, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010. 9. 14-9. 17, 長崎大学
5. 牛込直弥, 西川和久, 阿保智, 若家富士男, 岩松俊明, 尾田秀一, 高井幹夫, SSRM を用いたスパイクアニールとレーザアニールの組み合わせによる不純物活性化の比較, 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010. 9. 14-9. 17, 長崎大学
6. Satoshi Abo, Kazuhisa Nishikawa, Naoya

Ushigome, Fujio Wakaya, Toshiaki Iwamatsu, Hidekazu Oda, Mikio Takai, Local Resistance Profiling of Ultra Shallow Junction Annealed with Combination of Spike Lamp and Laser Annealing Processes using Scanning Spreading Resistance Microscope, 18th International Conference on Ion Implantation Technology, 2010. 6. 6-6. 11, Kyoto, Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阿保 智 (ABO SATOSHI)

大阪大学・極限量子科学研究センター・助教

研究者番号 : 60379310

### (2) 研究分担者

高井 幹夫 (TAKAI MIKIO)

大阪大学・極限量子科学研究センター・教授

研究者番号 : 90142306

若家 富士男 (WAKAYA FUJIO)

大阪大学・極限量子科学研究センター・准教授

研究者番号 : 60240454