

平成21年 5月15日現在

研究種目： 若手研究（B）  
 研究期間： 2007 ～ 2008  
 課題番号： 19760217  
 研究課題名（和文） ナノプローブによるTOF-ERDA軽元素分析技術の開発  
 研究課題名（英文） Development of light element analysis technique using TOF-ERDA with nuclear nanoprobes  
 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：150 keV 集束イオンビームと大口径の検出器を組み合わせた弾性反跳粒子飛行時間計測系の構築を行った。Si 基板への B 注入試料の計測を行い、それぞれの元素の検出に成功した。この計測結果より、B の深さ分布への変換を試みたが、本研究で用いた計測系では二次電子飛行距離の違いによる時間分解能の悪化が発生し B の濃度分布への変換は難しかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,500,000	0	1,500,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	330,000	2,930,000

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

集積回路に使用される半導体材料への不純物注入量の計測には、SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy: 二次イオン質量計測法) や RBS(Rutherford Backscattering Spectroscopy: ラザフォード後方散乱法)などが用いられてきている。国際半導体技術ロードマップによると、ドレインの拡張領域の深さ( $X_j$ )は2010年には6.5 nmにまで縮小され、このような浅い不純物分布の計測技術が必要とされており、原子～数nmの分解能での不純物濃度の定量的な計測技術の開発が求められている。SIMSは、破壊型分析法であることや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、数十ナノメートル以上の不純物注入試料の評価では信頼性があるが、 $X_j$ の計測など浅い不純物注入試料の評価には不向きである。これに対してRBSには、非破壊型分析法であることや標準試料が不要などの利点があり、エネルギー分解能を高めることで、数ナノメートルの分解能を実現可能なため、これまでに研究代表者はエネルギー分解に飛行時間を用いたTOF(Time-of-Flight)-RBSの開発や高いエネルギー分解能を持つトロイダル静電アナライザを用いたMEIS(Medium Energy Ion Scattering: 中エネルギーイオン散乱法)の開発を行ってきた。しかし、TOF-RBSでは、

イオンプローブとしてベリリウムイオンまたはシリコンイオンを用いており、プローブイオンよりも軽い、もしくは、ほとんど質量の変わらないボロン等の不純物分析はできない。また、MEISはヘリウムイオンをプローブに用いることでボロンの計測は可能となるが、計測対象が軽元素の場合には散乱断面積が小さくなり収量が激減することや高いエネルギー分解能を得るために反跳粒子のほとんどを検出器内部で失うため、数時間～十数時間という長時間の計測が必要となる。SIMS や MEIS に代わる技術として、SSRM(Scanning Spreading Resistance Microscope: 走査型拡がり抵抗顕微鏡)やSCM(Scanning Capacitance Microscope: 走査型容量顕微鏡)を用いた不純物分布の計測法が提案されているが、これらは分解能が20 nm程度であること、深さ方向の濃度分布を知るためには劈開や研磨等の試料の準備が必要となること、計測結果を直接不純物濃度に変換することができず計測結果とシミュレーションを組み合わせての解析が必要となることなどのため $X_j$ の計測には適していない。

以上のことから、短時間で標準試料無しに、また、試料の加工無しに定量的に軽元素の極浅分布計測が可能な技術の開発が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに述べた手法では計測が難しい極浅軽元素の分布計測を行うためのTOF-ERDA(Elastic Recoil Detection Analysis: 弾性反跳粒子検出法)を用いた計測技術の開発を目的とした。ERDAとは、プローブイオンによって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、非破壊でプローブイオンよりも軽い元素の計測を標準試料無しに行うことが可能である。元来は、試料中に含まれる水素原子をヘリウムプローブを用いて検出する方法であったが、本研究では、ヘリウムプローブではなくより重い集束シリコンプローブを用いることで、シリコン中のボロンなど軽元素の計測を可能とした。また、エネルギー分析に従来用いられてきた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、飛行時間を用いることで100 keV シリコンプローブを用いたボロン原子(原子番号5番)の検出でエネルギー分解能1 keV以下の達成を目的とした。TOF-ERDA計測での飛行時間分解能が2 - 4 ns であればエネルギー分解能1 keV以下、深さ分解能1 nm以下が実現可能であり、国際半導体ロードマップで必要とさ

れている6.5 nm以下の $X_j$ であってもボロンの詳細な深さ分布計測が可能となる。また、集束イオンビームを用いるため、10 nm以下の面内分解能を実現を目指した。さらに、本研究ではTOF-ERDAだけではなく、非常に高いエネルギー分解能を持つMEIS-ERDAも用いて同様の試料の計測を行い相互に補完を行った。MEISは長時間の計測が必要となるため、これらの計測法はTOF-ERDAで得られた結果の妥当性を検討するために用い、最終的にはTOF-ERDAのみで試料の加工なしに定量的な分布計測を目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究でのTOF-ERDA計測技術の開発は、大阪大学極限量子科学研究センターの最大加速電圧200 keVの集束イオンビーム(FIB: Focused Ion Beam)装置を用いて行った。このFIB装置はイオン源としてAuSiBeの共晶合金を用いており、最大200 kVで加速することで、Au, Si, Beそれぞれの200 keV(1価)、400 keV(2価)のイオンプローブを試料に照射することが可能である。また、測定結果の妥当性検討のためのMEIS測定についても、同様に現有の中エネルギービームラインを用いて行った。

2007年度には、FIB装置への検出器(MCP: Micro Channel Plate)の導入および計測系の構築を行った。

測定系の構築には(a)短時間計測、(b)高エネルギー分解能、(c)容易な元素分離の3点に重点を置いた。

### (a) 短時間計測

#### (I) シングルイベント計測法の確立

これまでに研究代表者が開発してきたTOF-RBS計測ではイオンプローブをチョッピングプレートでパルス化することでスタートシグナルを作り出してきた。しかし、この手法では、イオンプローブの大半はチョッピングプレートによって遮られ、実際に試料に到達し計測に使用されるイオン数は、全イオン数の千分の一程度でしかなかった。また、他の研究機関が行っているTOF計測では、スタートシグナルにプローブイオンがDLC(Diamond Like Carbon)ホイル通過する際に発生する二次電子を用いているが、この手法では、DLCホイルによってイオンプローブのエネルギーが失われるため、照射するイオンプローブのエネルギーに拡がりを持ってしまう。

そこで本研究では、試料から放出される二次電子を高速の二次電子検出器を用いて検出しスタートシグナルとして用いた。この手

法では、チョッピングプレートを用いていたパルス化に比べ同時時間で1000倍の収量が得られ、DLCホイルを用いた手法と異なりエネルギー拡がりなしにイオンプローブの試料への照射が可能となる。

二次電子検出器からのシグナルをスタートパルスに用いる本手法では、二次電子検出器で発生するノイズが誤ったスタートシグナルとして検出されるおそれがあるため、高速のディスクリミネータを用いて、閾値以下のノイズの低減を行った。

#### (II) 検出器の立体角

立体角の小さな半導体検出器(SSD)ではなく、大口径のMCPを用いることで収量の増加を図った。しかし、大口径のMCPでは、検出器の中心部と周辺部の飛行距離や散乱角が異なるため、エネルギー分解能の悪化にもつながる。これを防ぐため検出器の直前に散乱核の異なる反跳粒子を遮るスリットを設置を行った。

#### (III) 反跳・散乱断面積

本研究では100~200 keVのシリコンプローブを用いてボロン注入試料の計測を行った。100~200 keVのシリコンプローブを用いる本研究のTOF-ERDAでは、従来からの1.8 MeVのヘリウムプローブを用いたRBS計測と比較し、断面積が4-5桁以上向上するため短時間でのボロン計測が可能であった。

#### (b) 高エネルギー分解能

従来のRBSやERDA計測には、SSDが用いられている。SSDは設置や使用が容易であるという利点はあるが、エネルギー分解能が低い(15 - 20 keV)という問題点がある。このため、浅いボロン注入の試料の計測には不向きである。そこで、本研究ではエネルギー計測に飛行時間を用いることで高いエネルギー分解能の実現を目指した。

#### (c) 容易な元素分離

ボロン注入試料をヘリウムプローブとSSDを用いてRBS計測した場合には、ボロンスペクトルはシリコンスペクトルに重なって検出されるため、シリコンスペクトルの影響を考慮する必要が生じる。これに対して、TOF-ERDAスペクトルでは、ボロンスペクトルに遅れてシリコンスペクトルが検出されるためスペクトルの分離が容易と考えた。

2008年度には、2007年度に開発を行った計

測系を用いて、ボロン注入試料の計測を行った。ボロン注入試料は、最先端半導体集積回路のデバイスパラメータを反映した条件の試料とTOF-ERDA計測の動作確認のための高濃度注入試料を用いた。また同条件で作製した試料のMEIS-ERDA計測を行い両者の結果の比較を行った。

#### 4. 研究成果

2007年度には、TOF-ERDA計測で検出器に用いるMCPの現有イオンビーム装置への取り付け、飛行時間計測系の構築および構築した計測系の基礎特性評価を行った。MCPは通常のERDAで用いるSSDと比較し大口径であるため、収量の増加という利点と共に反跳角が広がりを持つため時間分解能(エネルギー分解能)が低下するという欠点の原因ともなった。そこで、取り付け前に収量と分解能の関係についてシミュレーションを行い、両者が許容可能な最適スリット幅を求め、MCP入射面を制限するスリット取り付けを行った。

基礎特性評価として150 keV Si<sup>+</sup>ビームを用いて5分間のB注入試料TOF-ERDA計測を行ったところ、BとSi基板からの反跳粒子による2つのピーク検出に成功し、計測系が正しく動作していることがわかった。また、Si基板からのピークでの収量比較では並行して開発を行っているTOF-RBS計測と比較して2桁程度高い結果となり、ERDAが高収量の計測法である事を示した。しかし、高収量実現のためにTOF-ERDA計測のスタートシグナルにはビームが試料に入射した際に発生する二次電子を用いているため、検出器までの二次電子の飛行経路の違いに起因する飛行時間差が発生してしまい、分解能の低下が発生した。これは、並行開発しているTOF-RBS計測でも時間分解能低下の原因となっており、二次電子検出器の構造変更による時間分解能の向上が必要となった。

2008年度には、2007年度に開発を行った計測系を用いて、ボロン注入標準試料のTOF-ERDA計測を行った。標準試料の作製条件は、注入エネルギー2 keV、注入量 $1.5 \times 10^{16}$  /cm<sup>2</sup>となっており、TOF-ERDA計測スペクトルを容易に評価するために現在半導体プロセスで使われている注入条件よりは注入量が多くなっている。2007年度に行った計測と同様に、150 keV Si<sup>+</sup>プローブを用いた計測で、BとSi基板のスペクトルを分離して計測することに成功した。このスペクトルより、Bの深さ分布への変換を試みたが、Si、B双方のTOF-ERDAスペクトルが完全に分離しておらず、現状の計測結果のまま深さ分布へ変換することは難しかった。最先端半導体集積回路

作製のパラメータを反映したBの低濃度注入試料では、時間分解能の悪化のためSi、B双方のTOF-ERDAスペクトルを分離することができず二次電子検出器の構造変更の必要性を示す結果となった。

TOF-ERDA計測結果と比較のため、同試料を100 keV Ar<sup>+</sup>ビームとトロイダル静電アナライザを用いた、MEIS-ERDAでも計測を行った。MEIS-ERDA計測では、BのERDAエネルギースペクトルがSiのERDAエネルギースペクトルに完全に重なっており、TOF-ERDA計測結果と比較するデータを得ることができなかった。これは、トロイダル静電アナライザでは、エネルギー分離のみしかできず、SiとB両方が検出されるERDA計測のためには、質量分離を行う必要があるためである。

本研究では、TOF-ERDAを用いた計元素計測技術の開発を行った。ターゲットとしているSi基板へのB注入試料のTOF-ERDA計測には成功したが、飛行時間のスタートシグナルに二次電子検出器からの信号を用いたために時間分解能が悪化したため、濃度分布を計測するには至らなかった。今後、二次電子検出器の構造変更による分解能の向上が必要である。

## 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)  
なし

## 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