

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560027

研究課題名(和文) シリコン中ドーパントの超高分解能深さ分布測定法の開発

研究課題名(英文) Development of high-resolution depth profiling of dopants in silicon

研究代表者

中嶋 薫 (NAKAJIMA, Kaoru)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80293885

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：高分解能ラザフォード後方散乱分光法(高分解能RBS)/高分解能弾性反跳粒子検出法(高分解能ERD)において、シリコン中のドーパントなどの軽元素に対する感度および深さ分解能の向上を目的とした改良を行った。シリコン基板または黒鉛基板の上にフッ化リチウムおよびリチウムを蒸着した試料の高分解能ERD測定を行って、リチウムに対する感度・深さ分解能を評価した結果、表面のリチウム原子について検出下限が0.01原子層以下(3e13 atoms/cm2程度)、深さ分解能が約0.5 nmが達成された。内部のリチウム原子に対しては、原子が存在する深さが5 nmの場合に深さ分解能は3 nm以下と見積もられた。

研究成果の概要(英文)：For high-resolution Rutherford backscattering spectroscopy (high-resolution RBS) and high-resolution elastic recoil detection (high-resolution ERD), the detector system has been reconstructed to improve the sensitivity and the depth resolution for relatively light atoms in silicon, such as dopant atoms (boron, phosphorus, etc.). The improved sensitivity and depth resolution was demonstrated by carrying out high-resolution ERD measurements of various samples, which were prepared by evaporating a small amount of lithium or lithium fluoride on a silicon wafer or a graphite substrate. Consequently, the sensitivity of less than 0.01 ML was achieved for lithium atoms at the surface of the graphite substrate under typical measurement conditions. The depth resolution was estimated to be 0.5 nm at the surface and was better than 3 nm in the surface region within 5 nm from the surface.

研究分野：イオンビーム工学

キーワード：半導体物性 表面・界面物性 軽元素分析 ドーパント イオン散乱分光法 弾性反跳粒子検出法 アトムプローブ

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者の研究室では、試料の元素組成とその表面近傍の深さ分布をサブ nm の深さ分解能で分析することができる、高分解能ラザフォード後方散乱 (高分解能 RBS) 装置を開発した。本装置は高分解能弾性反跳粒子検出法 (高分解能 ERD) にも利用できるものである。高分解能 RBS / 高分解能 ERD は、非破壊で深さ方向分析ができる、定量性が非常に高い、などの特長をもっている。しかし、軽元素に対する感度が比較的低い、サブ nm の深さ分解能で分析することができるのは表面近傍の数 nm の領域だけに限られる、などの欠点がある。申請者は、高分解能 RBS および高分解能 ERD を用いてナノスケールの薄膜の表面・界面や、シリコン半導体中の不純物原子や注入原子などの分析を行うとともに、継続して装置の改良を進めてきた。

(2) シリコン中のドーパント元素の深さ分布の測定には、これまで二次イオン質量分析法 (SIMS) が多く用いられてきた。SIMS は非常に感度が高いが、組成の定量性に難点があることが知られている。とくに表面にごく近い領域の定量性には問題がある。近年、表面領域の組成分析の新たな手法としてレーザー支援型の 3 次元アトムプローブ法 (3DAP) が開発された。レーザー支援 3DAP は、電界蒸発によって試料表面を 1 原子層ずつ蒸発させるので、感度が高く、試料の内部に至るまで深さ方向の分解能が極めて高い。しかし、測定中のチップ先端の形状変化の影響や、原子が試料表面から中性分子として脱離する可能性が指摘されるなど、SIMS と同様に定量性の面で難点があった。

2. 研究の目的

高分解能 RBS / 高分解能 ERD の優れた定量性と、レーザー支援 3DAP の高い感度、試料内部に至るまでの高い深さ分解能の両方を生かした組み合わせ分析の手法を確立し、シリコン中のドーパント原子などの比較的軽元素の、正確かつ超高分解能 (1 原子層ごと) の深さ方向分析の実施を目的とした。以下の項目に関して段階的に達成することを目指した。

(1) 高分解能 RBS / 高分解能 ERD による軽元素の分析における感度と正確性の向上。

(2) 高分解能 RBS 分析結果を使った、レーザー支援 3DAP 分析結果の較正法の確立。

(3) シリコン中のドーパント原子の正確かつ超高分解能の深さ方向分布測定の実施と評価。

3. 研究の方法

課題の研究期間中の研究室移転にともなう実験装置の故障等の修理・部品の再製作などのための研究の遅れにより、研究の進展は主に前節 (2. 研究の目的) の (1) にとどまった。したがって、本節では前節の (1) の研究方法に限定して記述することにする。

既存の 400kV のコッククロフト型イオン加速器から引き出した 200-400 keV の He⁺イオン

ビームを振り分け電磁石および一連のスリットでコリメーとし、超高真空散乱槽 (base 圧力 1e-10 Torr) 内の試料に照射する。試料で散乱された He⁺イオン (高分解能 RBS) または試料から反跳されたイオン (高分解能 ERD) を磁場型分析器でエネルギー分析し、マイクロチャンネルプレート (MCP) で位置検出を行うことにより、散乱イオンまたは反跳イオンのエネルギースペクトルを得る。

試料として数 nm 程度の厚さの酸化膜が表面に形成されたシリコン基板上にフッ化リチウムを蒸着したもの、または同基板上にリチウムをその場蒸着したものを使用し、実際の測定結果から達成された感度や深さ分解能の評価を行った。実際にシリコンのドーピングに用いられる元素ではなくリチウムを用いた理由は、安全上の理由と蒸着によって堆積量を簡単に制御できるからである。リチウムはホウ素など実際のドーパント原子より軽いので、正確な分析がより難しい。リチウムに対して達成された分析感度や深さ分解能は、実際のドーパントの分析においても達成可能であると期待される。高配向性熱分解黒鉛またはグラフェンなど、炭素材料の基板上にリチウムをその場蒸着した試料の分析と分析性能の評価も行った。また感度の向上を目的とした検出器系の改良を行い、その効果を調査した。

4. 研究成果

(1) ERD 測定においては、通常は分析したい元素 (ホウ素などのドーパントや本研究で用いたリチウム) より重いイオンをプローブイオンとして照射する。しかし、磁場型エネルギー分析器を用いた高分解能 ERD では、逆に分析したい元素より軽いプローブイオンを使うことで、原理的にはシリコン基板で散乱されたプローブイオンが目的的反跳イオンと一緒に MCP で検出されることが避けられる。実際に 200-400 keV の He⁺イオンをプローブイオンに用いることによって、散乱イオンの検出が抑えられ、感度の高い測定が可能であることを確かめた。

(2) 200-400 keV の He⁺イオンを用いた高分解能 ERD 測定において、シリコン基板から反跳されるシリコンイオンが多く存在していることが分かった。そこで、MCP の直前に適切な厚さの薄膜 (本研究では 0.5 μm のマイラー膜) を設置した。目的の軽元素の反跳イオンと反跳シリコンイオンの飛程の差を利用して反跳シリコンイオンだけを阻止することができることを示した。図 1 はシリコン基板上にフッ化リチウムを蒸着した試料の高分解能 ERD スペクトルである。赤がマイラー膜を設置する前のスペクトル、黒がマイラー膜を設置したときのスペクトルである。マイラーを設置することで、リチウムのピークの形やカウント数を変えずに反跳シリコンイオンによるバックグラウンドを効果的に取り除くことができていることが分かる。この方法は、ホウ素やリンなどシリコンより十分

軽いドーパントの分析において効力を発揮すると期待される。

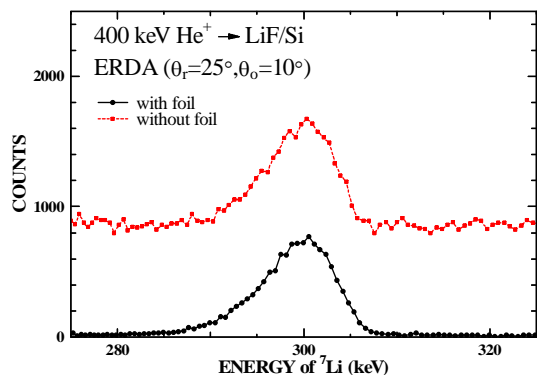


図 1 シリコン基板上にフッ化リチウムを蒸着した試料の高分解能 ERD スペクトル。

なお、マイラー膜は外部から直線導入機によって移動できるように設計されているので、目的の反跳イオンの種類やその他の条件に応じて、設置/取り外しが容易に行うことができる。

(3) 高配向性熱分解黒鉛に少量(1原子層から数原子層程度)のリチウムをその場蒸着した試料について高分解能 ERD 測定を行い、検出下限の評価を行った。前項で述べたマイラー膜を利用した測定の結果、黒鉛表面のリチウム原子について検出下限 0.01 原子層以下 (3×10^{13} atoms/cm² 程度) を達成した。図 2 は高配向性熱分解黒鉛に黒鉛の 0.4 原子層に相当する量のリチウム (1.5×10^{15} atoms/cm²) をその場蒸着した試料の高分解能 ERD スペクトルである。図 1 とは逆に、黒がマイラー膜を設置する前のスペクトル、赤がマイラー膜を設置したときのスペクトルである。マイラー膜の設置によって基板原子の反跳イオンによるバックグラウンドが大幅に減り、0.1 原子層のオーダーのリチウムでも明確なピークとして観察できることが分かる。

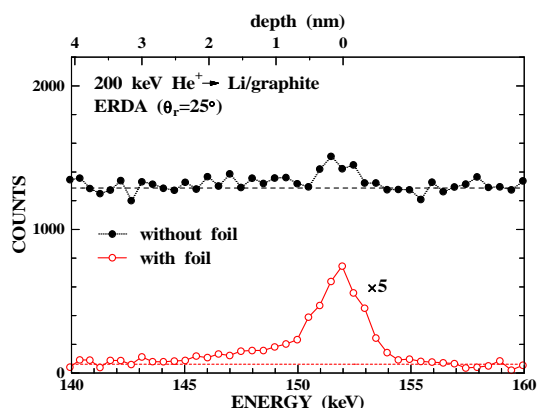


図 2 黒鉛基板上にリチウムをその場蒸着した試料の高分解能 ERD スペクトル。

(4) シリコン基板上にフッ化リチウムを蒸着した試料の高分解能 ERD 測定を行った結果から、深さ分解能の評価を行った。磁場型分析器の有限の受け角に起因するカイネマテ

ックブロードニングを補正する静電レンズを最適化することにより、表面のリチウムに対する深さ分解能として 0.5 nm を達成した。内部に存在するリチウムに対する深さ分解能は、プローブイオン、反跳イオンのエネルギー損失ストラグリングのために表面に比べて劣化する。エネルギー損失ストラグリングと多重散乱を考慮したシミュレーションプログラムの計算結果を利用して、内部のリチウムに対する深さ分解能を見積もった。その結果をリチウムが存在する深さの関数として図 3 に示した。赤印が見積もった深さ分解能である。存在する位置が深くなるとともに深さ分解能が劣化しているが、深さが 3 nm、5 nm の場合の深さ分解能がそれぞれ約 2 nm、3 nm であり、高い深さ分解能が達成されていることが分かる。前節(3. 研究の方法)でも述べたように、これらの高い性能はリチウムだけでなく、他の軽元素の分析でも同様に期待できるものである。

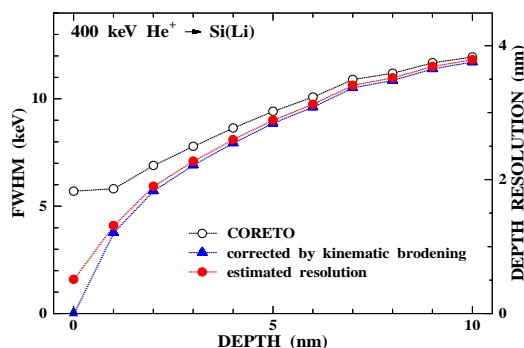


図 3 シリコン基板中のリチウムに対する高分解能 ERD の深さ分解能

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)

M. Nikko, K. Nakajima, and K. Kimura, A compact high-resolution elastic recoil detection system for lithium depth profiling, Nucl. Instr. Meth. B 354 (2015) 240-243, 査読有.
DOI:10.1016/j.nimb.2014.11.003

K. Nakajima, J. Lienemann, P. Eberlein, K. Kimura, H. Winter, Emission of Secondary Ions after Grazing Impact of keV Ions on Solid Surfaces, Nucl. Instr. Meth. B 340 (2014) 67-71, 査読有.
DOI: 10.1016/j.nimb.2014.07.035

K. Sasakawa, K. Nakajima, M. Suzuki, and K. Kimura, Effect of multiple scattering on high-resolution Rutherford backscattering spectroscopy, Nucl. Instr. Meth. B 285 (2012) 1-5, 査読有.

DOI: 10.1016/j.nimb.2012.05.002

〔学会発表〕(計1件)

柴山 茂久、中嶋 薫、坂下 満男、中塚 理、
木村 健二、財満 鎮明、Al₂O₃/Ge 構造に
対する熱酸化にともなうGe表面からのGe
原子放出過程の発見、第62回応用物理学
会春季学術講演会 14a-A24-5、東海大学湘
南キャンパス、2015年3月11日 - 15日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 薫 (NAKAJIMA, Kaoru)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80293885

(2) 研究分担者

()

研究者番号：