

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24年4月13日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360022

研究課題名（和文） 高分解能RBS法の超高感度化に関する研究

研究課題名（英文） Improvement of sensitivity in high-resolution RBS

研究代表者

木村 健二 (KIMURA KENJI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50127073

研究成果の概要（和文）：高分解能ラザフォード後方散乱法における検出感度は主にスペクトロメーターのバックグラウンド・ノイズで決定される。バックグラウンド・ノイズの主な原因は、スペクトロメーターの内壁で散乱されたイオンと検出器のダーク・ノイズである。これらを減少させる方法を開発し、最大で200分の1まで減少させることができた。これにより、シリコン中のヒ素の検出感度を10 ppmまで向上できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The sensitivity (limit of detection) of high-resolution Rutherford backscattering spectroscopy (HRBS) is mainly determined by the background noise of the spectrometer. There are two major origins of the background noise in HRBS, one is the stray ions scattered from the inner wall of the vacuum chamber of the spectrometer and the other is the dark noise of the detector. A method to reduce the background noise was proposed and the noise was actually reduced by a factor 200. The detection limit can be improved down to 10 ppm for As in Si at a measurement time of one hour under ideal conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：ノイズ低減、高分解能RBS、高分解能ERDA、軽元素分析、位置検出器

1. 研究開始当初の背景

高分解能ラザフォード後方散乱法（高分解能RBS法）は、400keV程度のHeイオンを試料に照射して、試料で散乱されたHeイオンのエネルギースペクトルを測定することにより、表面数十nm程度の領域の組成分布を行う分析法である。高分解能RBS法は、優れた深さ分解能（表面で0.2nm）を持ち、定量性の良い分析が、特別な前処理なしで比較的短時間（10-20分程度）で行えるため、

広い分野での応用が始まっている。高分解能RBS法の検出感度は、エネルギー分析器のS/N比で決定されるが、母相よりも重い元素の場合は数100ppm程度である。この感度は多くの応用においては十分であることが多いが、例えば次世代のULSIにおける極浅接合実現のためのドーパント分布の測定など、応用分野によっては検出感度の向上が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高分解能 RBS 法の検出感度を向上させ、シリコン中のヒ素の深さ分布の測定における検出感度を 10^{17} atoms/cm³ 台 (約 10 ppm) まで向上させることである。

3. 研究の方法

高分解能 RBS の検出感度を決定している一番大きな要因は、磁場型のエネルギー分析器のバックグラウンド・ノイズである。このバックグラウンド・ノイズには、(1) 検出器に使用しているマイクロ・チャンネル・プレート (MCP) のダーク・ノイズとともに、(2) エネルギー分析器の真空容器内壁で散乱した低エネルギー He イオンが寄与している。これらのバックグラウンド・ノイズを減少させるために、イオン検出用の MCP の直前に極薄のマイラ膜を設置して、真空容器内壁で散乱した低エネルギーの He イオンを除去するとともに、He イオンがマイラ膜を通過する際に放出する 2 次電子を同時検出して、He イオンの真の信号と、MCP のダーク・ノイズを区別することにより、ダーク・ノイズの除去を行う。

4. 研究成果

図 1 にヒ素を注入されたシリコンの高分解能 RBS スペクトルの測定例を黒丸で示した。380 keV 付近にピーク状のヒ素の信号が見えている。このピークの右側にほぼ一定の強度のノイズの信号が見えている。砒素の濃度を C とすると、その信号強度は

$$N_{net} = \alpha CT$$

バックグラウンド・ノイズは

$$N_{bg} = \beta T$$

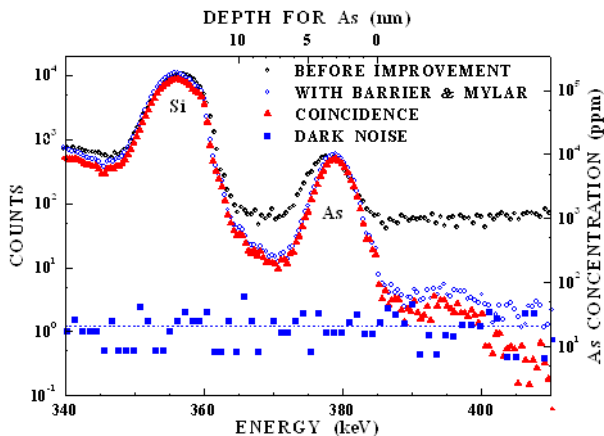


図 1 砒素を注入したシリコンの高分解能 RBS スペクトル。

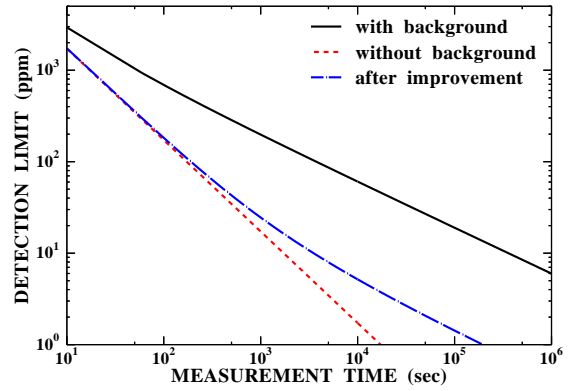


図 2 シリコン中のヒ素の検出感度

と表すことができる。ここで α β は定数であり、 T は測定時間である。次式

$$N_{net} = \Delta N_{net}$$

を満たす濃度 C で検出感度を定義すれば、

$$C_{lim} = \left(1 + \sqrt{1 + 8\beta T}\right) / 2\alpha T$$

で与えられる。実際の測定例をもとにシリコン中の砒素の検出感度を評価して、測定時間の関数として図 2 に示した。1000 秒 (約 17 分) の測定時間の時に、検出感度は 200 ppm である。図から測定時間を長くすれば検出感度を向上できることがわかるが、10 ppm の検出感度を得るには、360 万秒 (約 4 日) という費現実的な測定時間が必要となる。図には、バックグラウンド・ノイズがない場合の検出感度も破線で示した。ノイズが無ければ 10 ppm の感度が 1650 秒の測定時間で得られることがわかる。このように、バックグラウンド・ノイズの低減は、感度の向上に非常に大きな影響を与えることがわかった。

次に、バックグラウンド・ノイズの原因の 1 つであるエネルギー分析器の真空容器内壁で散乱した低エネルギー He イオンを除去する方法を検討した。図 3 に示すように、真空容器内にそのようなイオンの障壁を設けるとともに、検出器の前面に $0.5 \mu\text{m}$ の厚さのマイラ膜を設置した。この改造後に測定したスペクトルを図 1 に青丸で示した。バックグラウンド・ノイズが大きく減少していることがわかる。また、青四角のスペクトルは、He イオンビームを止めて測定した、検出器の純粋なダーク・ノイズである。400 keV 以上の領域では、バックグラウンド・ノイズはほぼこのダーク・ノイズのレベルまで低下していることがわかる。このダーク・ノイズを低減するために、次に示すような検出器系を設計製作した。

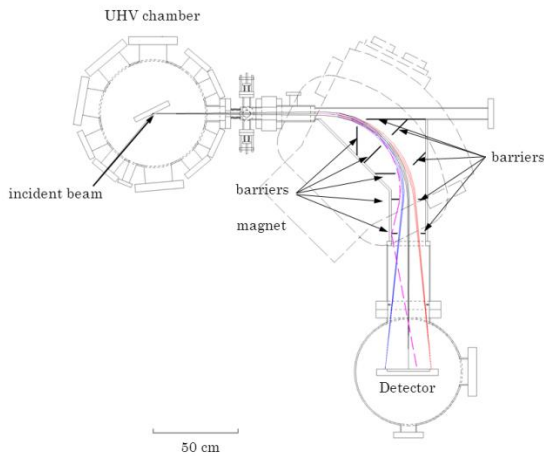


図3 エネルギー分析器に設置した障壁の概略図

図4は製作した新しい検出器系の模式図と写真である。この検出器系は、Heイオンを検出するMCPと、Heイオンがマイラ膜を通過する際に放出される2次電子を検出するための電子検出器、またその2次電子を電子検出器に導くための電極から成っている。図5にマイラ膜から放出された2次電子の軌道を計算した結果を示した。電極に適当な電圧を印加すれば、放出された2次電子はすべて電子検出器に導かれることがわかる。この検出器系を使って、電子の信号と同時に検出されたイオン信号のみを選び出すことにより、ダーク・ノイズを取り除くことができる。

図5にイオン用の検出器の出力信号の波高分布を示した。白丸は同時計測をしないときの結果である。新しい検出器系の効果を見るために、入射イオンの強度を落として、真のイオン信号よりもダーク・ノイズの信号が強い条件で測定している。このため、イオンの

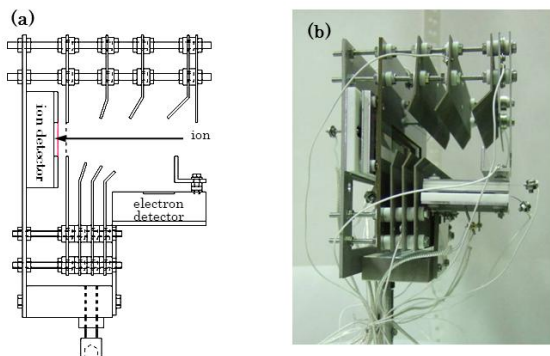


図4 開発した検出器系の概略図(a)と写真(b)

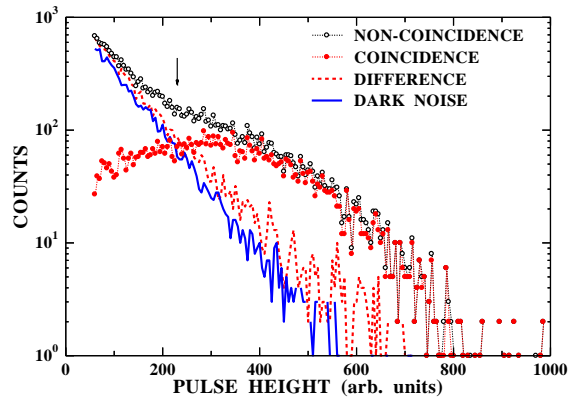


図5 イオン信号の波高分布

信号がきれいなピークを形成していない。次に、電子との同時計測をした時の結果を赤丸で示した。波高の低いダーク・ノイズが大幅に減少して、波高分布がピーク状になっていることがわかる。同時計測の有無の2つの波高分布の差を破線で示した。一方、イオンビームを止めて測定したダーク・ノイズの波高分布を青い実線で示している。両者はよく一致しており、同時計測によって、ダーク・ノイズがほぼ完全に除去できたことがわかる。

この同時計測によるダーク・ノイズ低減法では、2次電子の放出確率と検出確率が100%ではないため、真のイオン信号を数え落とすことがある。このため、イオンの検出効率の評価は、この手法を実際に応用する場合には重要である。そこで、入射イオン強度が強い条件で、図5と同様の測定を行った。図6にその結果を示した。白丸が同時計測をしないときのイオン信号の波高分布である。また、赤丸は電子との同時計測の結果である。両者の強度比を青三角で図に示した。強度比はパルスの高さに寄らずほぼ85%と一定であり、

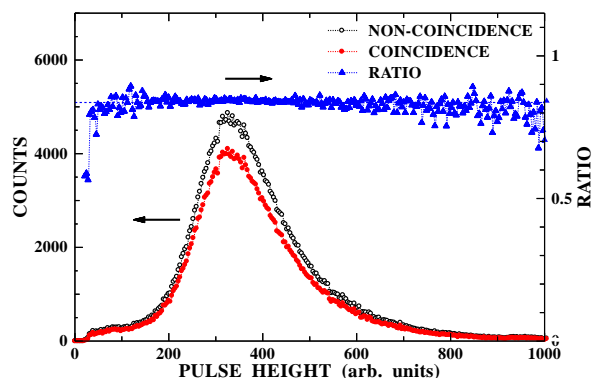


図6 入射イオン強度が十分強いときのイオン信号の波高分布

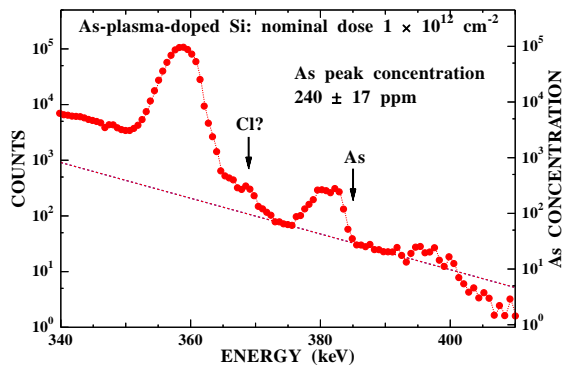


図7 1×10^{12} atoms/cm²のヒ素を注入したシリコンの高分解能RBSスペクトル

十分高い検出効率で同時計測が可能であることがわかった。

この新しい検出器系を使って、同時計測により得られた高分解能RBSスペクトルを、図1に赤三角で示した。スペクトロメーターの最初の改造後に得られた青丸のスペクトルに比べて、さらにバックグラウンド・ノイズが低減していることがわかる。特に、400 keV以上の領域では、改造前のスペクトル(黒丸)に比べて、200分の1までバックグラウンド・ノイズが減少していることがわかる。このときの検出感度の計算値を図2に一点鎖線で示した。約1時間の測定で、10 ppmの感度が得られることがわかった。最後に、 1×10^{12} atoms/cm²のヒ素を注入したシリコンを開発した検出器系を用いて測定した高分解能RBSスペクトルを図7に示した。バックグラウンド・ノイズは十分に低下していることがわかるが、まだ、完全には取り除けていない。これは、エネルギー分析器の真空容器内壁で散乱した低エネルギーHeイオンが完全に除去できていないことが原因であると考えている。このノイズを完全に除去することにより、更なる検出感度の向上が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

(1) "Improvement of sensitivity in high-resolution RBS"

H. Hashimoto, K. Nakajima, M. Suzuki, K. Sasakawa, K. Kimura

Rev. Sci. Instrum. **82** (2011) 063301.

(2) "Improvement of sensitivity in high-resolution ERDA"

H. Hashimoto, K. Nakajima, M. Suzuki, K. Sasakawa, K. Kimura

Nucl. Instr. and Methods B, **273** (2012) 241.

〔学会発表〕(計5件)

(1) "Improvement of sensitivity in high-resolution RBS by reducing detector noise"

H. Hashimoto, K. Nakajima, M. Suzuki, K. Sasakawa, K. Kimura

The 6th International Workshop on High-Resolution Depth Profiling, 2011/6/29, Paris, France

(2) "High-resolution depth profiling of boron in silicon: comparison between high-resolution RBS/ERDA and atom probe"

Sho Fujita, Kaoru Nakajima, Kaoru Sasakawa, Motofumi Suzuki, Wilfried Vandervorst, Kenji Kimura

8th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, 2011/5/24, Seoul, Republic of Korea

(3) "Improvement of sensitivity in high-resolution RBS/ERDA"

Hashimoto, K. Nakajima, M. Suzuki, K. Sasakawa, K. Kimura

The 20th International Conference on Ion Beam Analysis, 2011/4/14, Itapema, Brazil

(4) 高分解能RBS/ERDAの検出器系におけるバックグラウンド・ノイズ低減

橋元弘貴, 藤田 頌, 中嶋 薫, 鈴木基史, 木村健二

第58回応用物理学関係連合講演会 2011年3月25日 神奈川工科大学

(5) 高分解能RBS法の検出器系におけるバックグラウンド・ノイズ低減

橋元弘貴, 中嶋薫, 鈴木基史, 木村健二

第59回応用物理学関係連合講演会 2010年3月19日 東海大学 湘南キャンパス

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村健二 (KIMURA KENJI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50127073

(2) 研究分担者

鈴木基史 (SUZUKI MOTOFUMI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00346040

中嶋薫 (NAKAJIMA KAORU)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80293885

(3) 連携研究者

()