

RBS/Cを用いた水素イオン注入欠陥の評価 Evaluation of Hydrogen Induced Defects Using Channeling Rutherford Backscattering Spectroscopy

岩田博之[†], 清水孝延[†], 横井久人[†], 石神龍哉[‡], 伊藤慶文[‡], 徳田豊[†], 高木誠^{††},
H. Iwata^{††}, T. Shimizu, H. Yokoi, T. Ishigami, Y. Ito, Y. Tokuda[†], and M. Takagi^{††}

Abstract: High dose Hydrogen implantation (80keV , $5 \times 10^{16} \text{H} \cdot \text{cm}^{-2}$) induce exfoliation phenomena after 500°C heating. In this study, for making of the influence of impurity clear, the damaged layer in the hydrogen-implanted silicon was observed with cross sectional transmission electron microscopy and channeling Rutherford backscattering spectroscopy. The behaviors of three types of specimens (p⁺⁺, p and n type, respectively) were compared. The quantity of defect is proportional to the concentration of dopant, and it is interesting to note that p⁺⁺ and p type had a sharp peak in the depth profile, but n type had a broad peak and a second peak in a shallow region.

1. はじめに

素子間分離に優れ高速, 低消費電力, 高耐圧等の特徴を持つ半導体 SOI 薄膜(silicon on insulator)の形成法には, 酸素イオン注入法, 張り合わせ法など数種の技術が開発されているが, 結晶品質に起因する電気特性の劣化, 研磨による Si 結晶の浪費等問題点があった. これらの問題を克服しうる技術として約 $10^{17} [\text{H}/\text{cm}^2]$ の高ドーズ水素イオンをシリコンへ注入する手法が注目を浴びている⁽¹⁾. この手法の最大のポイントはアニール時に高ドーズ水素イオン注入層において膜厚均一に剥離現象が発現することである. 本手法は現在産業応用面で急速に開発が開始され, 現在 SiC やダイヤモンドなどの薄膜作製をはじめ他種材料の微細加工へ技術移転されるに至った⁽²⁾. しかし本手法に用いられる技術には未解明の基礎的物理解現象が多く残されている.

従来から剥離のメカニズムを解明するため, 透過電子顕微鏡(TEM)による評価を主体に剥離発現前後の結晶欠陥分布の変化の様子について報告してきた. 今回新たにラザフォード後方散乱分光法を用いて, 欠陥量分布の定量的評価を目指したのでその結果を述べる.

2. 概説

イオン注入とは, 目的とする元素をイオン化し, 静電的に加速し, 固体中に注入することを言う. そのときの加速電圧は数十 keV ~ 数百 keV で, 加速電圧の加減により, 不純物の注入深度が制御できる. またイオンビームの電流密度, 注入時間の制御により, ターゲットの固体に精度よく均一にイオン注入ができる.

イオンを注入する際, 結晶の特定の面方位とイオンビームの方向が一致したときターゲットの内部に深く強く注入, 分布する. このような現象をチャネリング効果という. しかし, 同じ注入条件でも, 少しでも傾いているときや, ターゲットが非結晶の場合は表面近くに浅く分布する. このことを, ランダムビーム効果という.

高エネルギーイオン注入によって, ターゲットである個体は様々な損傷をうける. チャネリング効果に対する注入イオンエネルギー損失は $0.1 \sim 1 \text{eV}/\text{\AA}$ と少なく結晶原子に与える影響は無視してもよい. これに対してランダムビーム効果に対する注入イオンのエネルギー損失は数 ~ 数十 $\text{eV}/\text{\AA}$ に達するため結晶原子に与える影響は大きく結晶中に損傷が生じ, これが欠陥となる.

注入イオンは特にランダムビーム効果の場合, 基板中で静止するまでに基板を構成する原子と多くの衝突を繰り返し, その都度, 原子にエネルギーを与える. 注入イオンからの伝達エネルギーが変位エネルギーより大きいと, 基板原子は格子点から飛び出し, ノックオン原子となってさらに2次, 3次のノックオン原子を生成する. 多数のノックオン原子は空格子点と対になり, フレンケル形欠陥となる. 軽いイオンの場合, 基板中を進行する際の電子衝突によるエネルギー損失や, それに伴った核衝突によるエネルギー損失の割合が増えるが, 重いイオンのようにはその割合は大きくないのでイオンの軌跡に沿ったフレンケル欠陥が生じる. このようにして欠陥層が形成される.

[†]愛知工学部工学部電子工学科 (豊田市)

[‡](財)若狭湾エネルギー研究センター (敦賀市)

^{††}愛知工業大学工学部機械工学科 (豊田市)

ウェハに注入されたイオンはノックオン原子共に格子間位置を占め(これを格子間原子という)、結晶性の回復するためにもとのエネルギー準位を形成し(格子点に相当する置換位置を占め)なければならず、同時にノックオン原子等の不純物原始を格子点に置換することで欠陥を回復しなければならない。これを熱処理によって行うことをアニーリングという。

チャンネル効果よりもランダム効果のほうが、欠陥量は多い。また、同じエネルギーでイオンを注入した場合、軽いイオンのほうが、アモルファス層を形成するための臨界注入量が大きく、損傷量は少ない。

イオンの注入量がある値まで増加すると、損傷量はあまり変化しなくなる。フレンケル欠陥は注入温度が室温でも大きな移動度を持ち、注入時にかなりの焼鈍(アニールと同じ効果)が起きる結果であると解釈されている。軽いイオンの場合、注入温度を低くし、欠陥の移動度を小さくすることで、発生した欠陥は焼鈍されることなく凍結され、注入イオン1個あたりの欠陥の数が増加することになる。

イオンの注入条件や、ターゲットの種類などイオン注入における様々な物理現象をモンテカルロ法により精度よくシミュレーションするためSRIM2003を用いた⁽³⁾。イオン注入のみならずイオン照射を用いた分析評価においても結果評価のうえで大きな役割を果たす。入射イオンが減速する過程でターゲット原子と衝突を繰り返し、はじき出されたターゲット原子がさらに衝突の連鎖(衝突カスケード)を形成してゆく様子が判る。

固体試料に、数MeV領域の高エネルギーで加速した軽イオン(H⁺, He⁺など)ビームを入射し、ラザフォード散乱によって試料表面から後方へ散乱されるイオンのエネルギーを測定することで、試料中の組成を定量する分析方法である⁽⁴⁾。そのプロセスはつぎのとおりである。試料表面から固体内の原子と衝突するまで照射イオンは電子との非弾性散乱を繰り返しながらエネルギーを失う。運動方向は多少歪められるが入射方向を維持する。続いて固体内の原子によって散乱されエネルギーを失う。運動方向は大きく変えられる。この時原子の違いが失うエネルギーに影響する。

このことから、測定された散乱イオンのエネルギーに対する散乱イオン数は、ある深さでどれだけ散乱されるかを表し、深さ方向の試料組成を知ることができる。

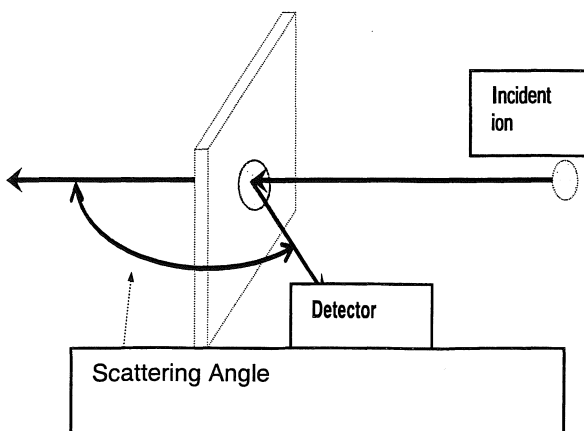


Fig.1 Schematic of RBS

3. 実験

本研究ではP型、N型を比較すると同時に、ドーパント濃度による違いを評価するため以下の3種の試料を用いた(表2)。また、表面の剥離が安定して起こる条件として表3示す水素イオン注入条件を選んだ。

Table 1 Sample Parameter

type	dopant	resistivity (Ω cm)
P	B	6-8
P++	high concentration B	0.014
N	P	1-2

Table2 Condition of H⁺ Implantation

Incident Angle	7°
Energy	80keV
Dose	$5 \times 10^{16} / \text{cm}^2$
Temperature	150°C

与えられた今回の注入条件についてシミュレーションを行った結果、水素イオンの分布はおよそ700nm程度の深さに集中し、置換原子やSi空孔は650nm程度の深さに集中する。欠陥層の因子は、置換原子や空孔などの結晶欠陥や、Si-H結合が考えられるため、両結果から欠陥層は600~750nmの深さに分布していると推察される。

TEMの断面像より、欠陥層の深さを表面と最も深い部分との距離とし、それぞれの試料の欠陥層の深さ、厚さを測定した(図2)。

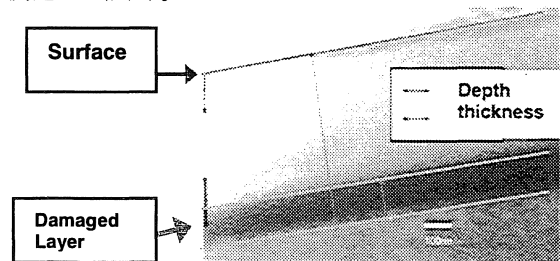


Fig2 Damaged Layer obtained by XTEM

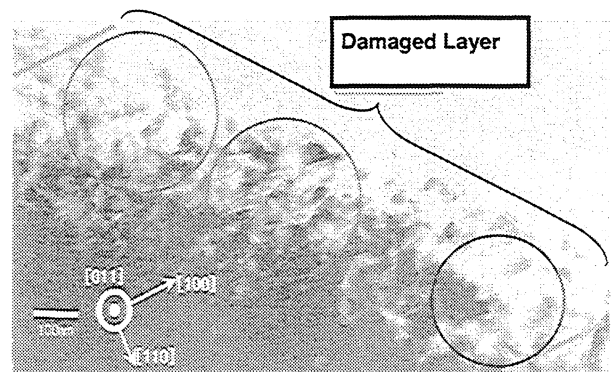


Fig.3 Defects in Damaged Layer by HR-XTEM

また、TEMの高分解能像を用い、欠陥層内の欠陥の様子を観測した。3種の試料とも欠陥層を深さ方向に5分劃し、その特徴を比較検討した(図3)。

RBSによる欠陥分布の計測においては欠陥層が特徴的に現れるピークの部分に着目し、ピークの高さ、深さを比較した。

Table3 Beam Condition at RBS

Acceleration Voltage	3MeV
Ion type	He
Beam size	1mm×1mm

Table4 Results from XTEM

Sample type	Average Depth (nm)	Thickness (nm)
P++	759	185
P	769	191
N	767	206

RBS実験からの分析結果の処理法を以下に説明する。グラフの縦軸と横軸はそれぞれ散乱イオン数と散乱イオンのエネルギー値を示し、上から3パターンで試料にイオンビームを照射した測定結果である。試料表面が表横軸右端のグラフ

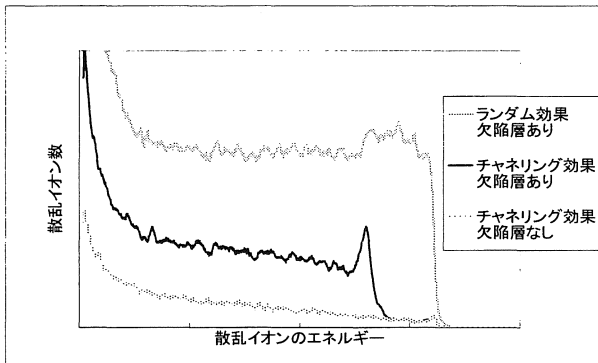


Fig.4 Result of RBS (N-type Silicon)

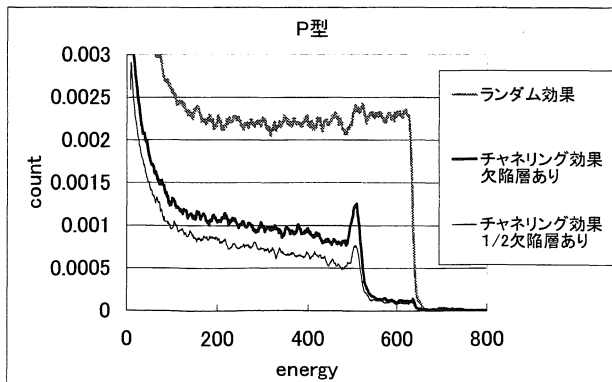


Fig.5 Results of RBS (P-type Silicon)

の立ち上がり部分のように表れ、そこから原点に向かって深さ方向をあらわしている。ランダムはチャネリングに対して散乱イオン数が表面から急激に増加し試料内部の特性がはっきりと現れない。これはイオンビームの飛程を遮る原子が多くなるからである。欠陥層がある場合は代表的な

欠陥である格子間原子が飛程を遮るために、明確なピークが得られる。このピークの高さや深さから、欠陥量の深さ分布を定量することができる。

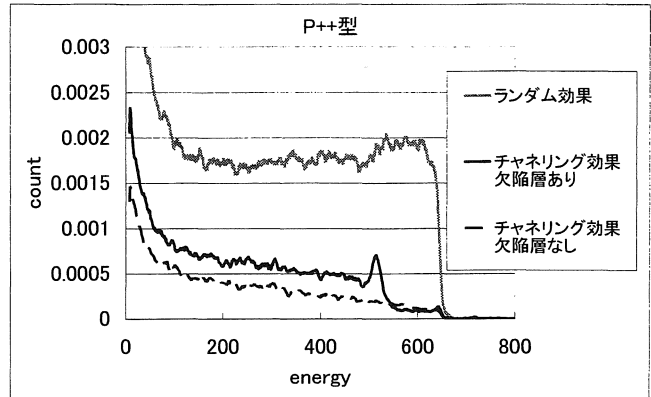


Fig.6 Results of RBS (P++ type Silicon)

4. 結果および考察

欠陥層の深さ、厚さの測定結果は表4に示すとおり。深さはそれぞれ10nm程度、厚さは20nm程度の差となり大きな差は現れなかった。

3種の試料に共通して図13に現れるように、中層部に欠陥が集中し上層から中層にかけて試料表面に水平な{100}面の欠陥が見られ、下層部では試料表面に対して斜めな{110}面の欠陥が見られた。しかし、3種による特徴の違いは見られなかった。

RBS測定結果例を図4以下に示す。ランダム効果、チャネリング効果欠陥層あり、チャネリング効果欠陥層なしの順に散乱数が少なくなることや、欠陥層のある部分にピークが現れるなど、数値を除いてほとんどの特徴が共通していた。

次に、各Heイオン照射パターンにおける3種の試料の比較から、ランダム効果と、チャネル効果欠陥層ありにおいてカウント数がP、N、P++の順に少なくなっていることが特徴として挙げられるが、チャネル効果欠陥層なしにおいて多少のずれがあることから試料ごとにチャネル軸のずれがあるため正確に比較を行うことはできない。次に、ピークの部分に着目し、ピークの高さ、深さの点から3種の試料を比較した結果ピーク深さについてはN、P、P++の順に深くなっていることがわかる。

欠陥層の深さ、厚さ測定結果において大きな違いは見られずドーパントの違いによる影響はないと考える。また若干のばらつきが見られたのはTEM断面試料作成時にまったく同じ条件の試料が作成できないことや、欠陥層境界の定義時に多少差が出たことが考えられる。

また、RBS測定結果のピーク深さ比較においてNよりPのほうが浅くなるという結果が出たが、これはPのドーパントであるボロンの質量がNのリンの質量より小さく、核阻止能が低いため若干深い位置に水素が分布したと考えられる。

RBS測定結果のピーク高さ比較においてN型より若干P型のほうが高くなったが、これはボロン-水素複合体の形成効率がリン-水素複合体の形成効率よりも高いため、格子間位置を占める水素量が多くなることが影響したと考えられる。P++が他の2種類の試料に比べて約半数の後方散乱量

になったことについて、RBSにおける後方散乱数の減少は欠陥量の減少や散乱する時の試料組成原子の質量の小ささを表すことから、欠陥量が減少したことも考えられるが全格子間原子量中の格子間ボロン量の割合が増加したことが主な原因であると考ええる。

欠陥量の深さ分布測定において、TEMの高分解能観察では試料間の定量的な比較は困難であった。これは前にも挙げたが、同じ条件の断面試料を作製することが不可能であることが理由であろう。その点RBSでは試料に多少のダメージを与えるが、非破壊的な測定と言えるほどである為に容易に定量的な比較が出来、TEMによる高分解能観察の弱点を補うことができた。しかし結晶欠陥を評価するためには、欠陥量の深さ分布だけでなくその他様々な情報を多角的に収集することが重要であり、RBSのみでは結晶方位など解らない情報もあるため、TEM観察とRBSを組み合わせることで考えることが重要である。

謝辞

大型加速器を用いたRBS分析は財団法人若狭湾エネルギー研究センターと愛知工業大学との共同研究契約に基づき同センター内のW-MASTを用いて実施した。

本研究における試料作製において、東京大学原子力研究総合センターの援助による原研施設利用共同研究として日本原子力研究所高崎研究所イオン照射研究センターにおいて水素イオン注入を主体とする照射実験を実施した。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)からの援助で実施した。

本報告の内容は愛知工業大学工学部電子工学科の16年度および17年度卒業論文の内容をまとめたものであり、実験協力いただいた当時在学学生に対しここに記し感謝の意を示す。

参考文献

- 1) M. Bruel, Electronics letters ; 31 (1995) 1201
- 2) Q.Y. Tong, R.W. Bower, MRS Bulletin. 23 (1998) 40
- 3) <http://www.srim.org/>
- 4) 藤本文範, 小牧研一郎, イオンビームによる物質分析・物質改質, 内田老鶴圃(2000)
- 5) T. Hochbauer, A. Misra and M. Nastasi, J.W. Mayer, Physical mechanisms behind the ion-cut in hydrogen implanted silicon, Journal of Applied Physics, Vol.92, pp.2335-2343, (2002)

(受理 2006年5月2日)