

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760039

研究課題名(和文) EBIC法と陽電子マイクロビーム法による半導体中欠陥の高度化解析システムの構築

研究課題名(英文) Construction of advanced observation system for semiconductor defect using scanning positron microbeam and electron beam induced current method

研究代表者

前川 雅樹 (Maekawa, Masaki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：10354945

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、我々が開発した世界最高レベルの収束度を持つ陽電子マイクロビーム装置に、電子ビーム誘起電流(EBIC)測定回路を付加することで、半導体試料に存在する欠陥の評価を行うことを目的とした。まずEBIC測定系を構築し、欠陥コントラストを検出しながら同時に陽電子消滅法で消滅線を測定するシステムを構築した。マスキングを施すことで部分的にHe照射したSi試料の測定では、EBIC法・陽電子法ともに照射領域でコントラストが発現した。消滅線の精密測定から欠陥構造を推定したところHe原子が充填された複空孔であることが分かり、キャリア再結合中心が空孔型欠陥と関連があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：A complementary study of vacancy defects in Si substrates by using scanning positron microscope (SPM) and electron beam induced current (EBIC) method were demonstrated for the same samples and in the same chamber. Both the S parameter and EBIC contrast were found to be enhanced in the regions containing vacancy defects introduced by ion implantation. That is, the SPM provides a criterion if the spatially resolved carrier recombination centres by the EBIC method are originating from vacancy defects or not.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：陽電子マイクロビーム 空孔型欠陥 空間分布 EBIC測定 欠陥準位 再結合中心 イオン照射

1. 研究開始当初の背景

陽電子消滅法は格子欠陥を非破壊かつ高感度に検出できる手法として、半導体材料中に存在する原子空孔の評価に広く用いられている。測定のためには陽電子を試料に注入する必要があるが、その方法としては、エネルギー可変の低速陽電子ビームを用いる方法が有用である。打ち込みエネルギーを可変させることで、表面近傍(表面から数 μm)に存在する格子欠陥の検出および深さ方向の分布の取得が可能となる。これに加え近年、私は通常数mmの低速陽電子ビームを数 μm に収束させることに成功した。これにより、従来の低速陽電子ビーム法では取得できなかった、空孔型欠陥分布の2次元イメージが取得可能となった。数 μm への収束技術を持つのは国内では当グループのみであり、現時点で世界トップクラスの性能である。本装置は市販の走査型電子顕微鏡(SEM)をベースにしており、SEM同様の柔軟な運用が可能であるという特徴がある。

一方で、通常のSEMでは以前より電子ビーム誘起電流(EBIC)を用いた欠陥の検出が行われてきた。半導体の空乏層やPN接合領域を電子プローブで走査すると、内部電界により励起された電子はn領域へ、正孔はp領域に移動し、誘起電流が発生する。もし結晶欠陥が存在すると、電子や正孔がトラップ・再結合し、誘起電流が減少する。この電流変化を画像化すると、pn接合や結晶欠陥の存在を2次元像として観察できる。本手法は半導体デバイスの動作状態の確認、材料の結晶欠陥の観察などに使われている。しかし、EBIC法では欠陥の存在をコントラストとして示すことは出来ても欠陥種の同定までには至らない。EBIC法で検出しているのはキャリアの再結合すなわち欠陥準位であり、デバイスの電気的特性に影響している。欠陥準位の起源としては構造不整や不純物などさまざまなものが考えられるが、たとえばシリコン酸化膜界面ではシリコンダングリングボンドといった欠陥構造が起源と考えられている。陽電子消滅法が検出するのはこのような空孔型欠陥であり、欠陥種の同定が可能である。この両者の測定を同時に行うことができれば、欠陥準位の原因となる欠陥構造の起源に迫る新たな評価手法が構築出来ると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、既存の陽電子マイクロビーム装置に対し、EBIC測定系を付加することで検出された欠陥コントラストに対し、さらに陽電子マイクロビームを適用し、その欠陥構造を同定するという新たな物性評価手法を確立させることを目的とした。これにより、従来のEBIC法では単なるコントラストとしてのみ評価が可能であった欠陥準位の由来となる結晶欠陥の素性を明らかとし、半導体評価における電子顕微鏡および陽電子消滅法

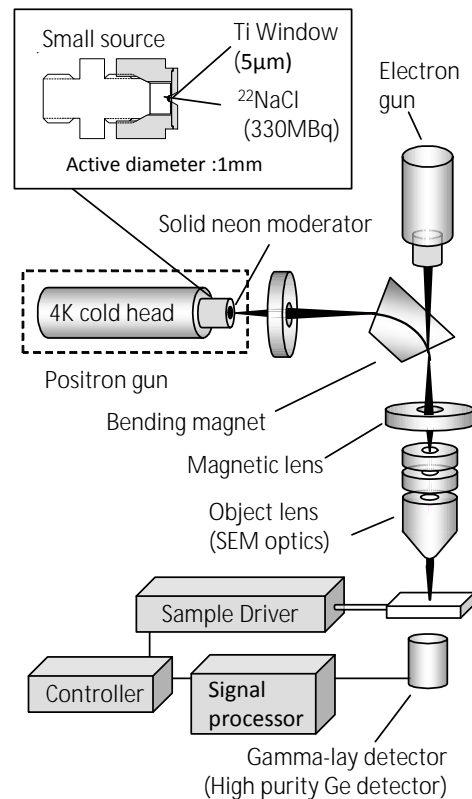


図1 陽電子マイクロビーム装置概略図

の双方の測定手法の高度化が期待できる。また、開発した手法を用いて、半導体中の欠陥評価を行い、各種の半導体デバイス基本構造中に存在する構造欠陥の評価を試みる。

3. 研究の方法

本研究では、陽電子マイクロビーム装置にEBIC測定を行うための検出システムを構築した。具体的には、EBICを測定するための高感度電流計、電圧印加用ライン、2次電子検出器を整備し、計測制御のためのソフトウェアを開発した。EBIC法あるいはSEM観察によって検出される欠陥コントラストと陽電子消滅法から決定できる欠陥構造を対比し、欠陥準位が由来する構造欠陥を決定した。

陽電子マイクロビーム装置は、原子力機構で開発されたものを使用した(図1)。これは、陽電子線源(Na-22)から発生した陽電子ビームを、電子レンズを用いて試料上の任意の場所へ収束できる。打ち込まれた陽電子は付近の格子欠陥や構造欠陥にトラップされ消滅し、消滅ガンマ線を放出する。このガンマ線のエネルギー分布は消滅相手の電子運動量分布を反映して完全結晶、空孔、ポイド、析出物等により変化するので、これらの同定が可能である。

試料には、シリコンなどの半導体を基板とし、pn接合を形成したもの、あるいは酸化膜形成後に金属を蒸着し金属/酸化膜/半導体(MOS)構造を形成したものをを用いた。これらにバイアス電圧を印加し、空乏層を形成し、EBIC測定による欠陥検出を行った。また同一

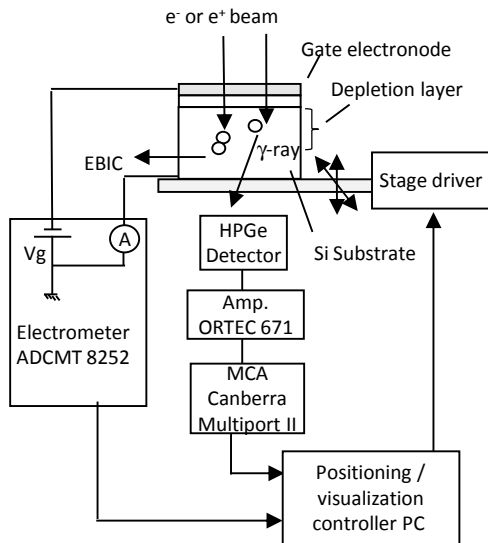


図 2 構築した EBIC 測定系および陽電子消滅測定系の構成図。

の試料に対し、陽電子マイクロビームでの欠陥検出および構造同定を行い、両者の比較を行い欠陥構造を推定した。

4. 研究成果

最初に、既存の陽電子マイクロビーム装置に EBIC 測定に必要な信号処理系を整備した。試料へのバイアス印加を容易に行えるよう、絶縁タイプの試料ホルダーを製作し、試料にバイアス電圧を加えつつ高感度電流測定が可能な計測システムを構築した。これに収束電子ビームを走査させることで EBIC 法により欠陥分布と形状を検出しながら、同時に陽電子消滅法で欠陥種を同定することで欠陥構造を知ることが出来るシステムを構築した。構築したシステムの概略図を図 2 に示す。

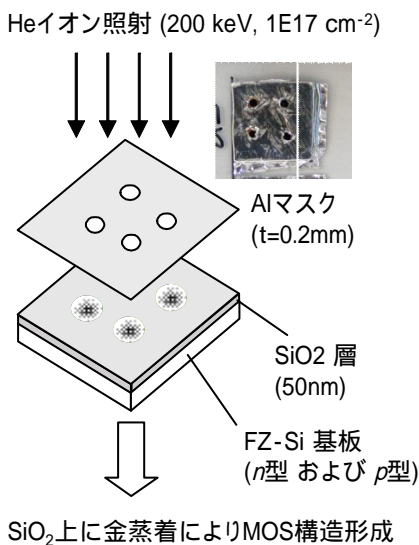


図 3 試料作成の概略図

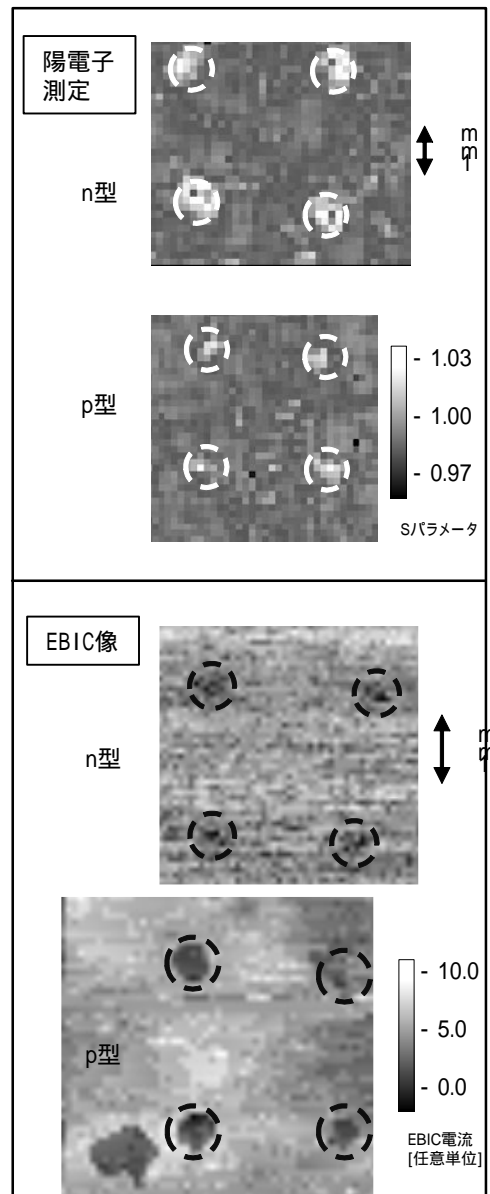


図 4 陽電子マイクロビーム走査による S パラメータの空間分布 (上段) と、電子ビーム走査による EBIC 像の測定結果。試料は陽電子測定と EBIC 測定で同一の物を使用。点線はマスクの穴位置を示す。

作成した試料の概略を図 3 に示す。試料には、n 型および p 型の FZ-Si 基板上に熱酸化法により厚さ 50nm の SiO_2 膜を表面に製膜したものをを用いた。これに対しアルミ板のマスクパターンを通じて He イオン照射 (200 keV、 $1\text{E}17\text{cm}^{-2}$) を行い、局部的に照射欠陥を導入した。照射後にマスクパターンを取り除き、金蒸着により 15nm の電極を形成し、金属/絶縁体/半導体構造 (MOS 構造) を作成した。

これらの試料に対し、空乏層が形成される電圧 (n 型では -2V、p 型では +2V) を印加して、マイクロビーム装置に備えられた電子銃からの電子ビームを入射させて誘起電

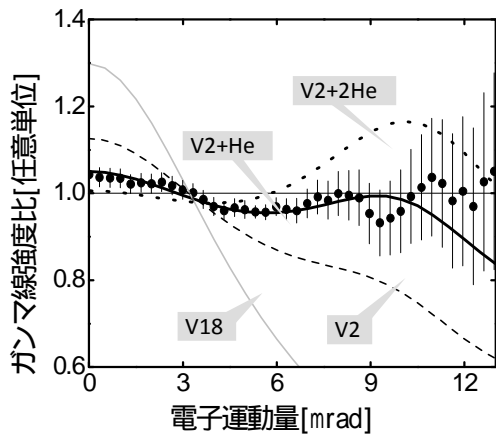


図 5 EBIC 電流の減少部位における陽電子消滅線エネルギー分布の詳細測定の結果。実線は各種欠陥モデル構造の第一原理計算結果。

流を発生させ、試料を平面的に走査することで EBIC の二次元分布イメージを取得した。さらに、同一の試料に対し、陽電子マイクロビームでも二次元走査を行い、消滅ガンマ線のエネルギー分布変化 (S パラメータ) の空間分布を取得した。その結果を図 4 に示す。まず EBIC 法では、イオン注入領域で誘起電流の減少がみられた。一方、陽電子マイクロビーム測定では、イオン注入領域でのみ S パラメータが増大した。S パラメータの増加割合から、これは空孔型欠陥由来と考えられる (欠陥構造については後述)。これは、イオン照射によって生成した空孔型欠陥が、EBIC 測定では誘起電流減少を引き起こす再結合中心となり、陽電子測定では空孔型欠陥として検出されたものと考えられ、電子準位に関連する再結合中心と構造欠陥に関連があることを示唆している。EBIC 法では n 型及び p 型試料で同様のコントラストが見られたが、陽電子測定においては、p 型の試料では、n 型の試料に比べて S パラメータの増大は少なかった。これは p 型の試料では欠陥の荷電状態がプラスであるため、陽電子の捕獲効率が低下したためと考えられる。

さらに、欠陥構造の推定を行った。これは、陽電子測定において S パラメータが増大した領域において消滅線のエネルギー分布を詳細に測定し、第一原理計算による欠陥モデル計算と比較することでおこなった。その結果を図 5 に示す。第一原理計算は V2 (複空孔)、V18 (空孔クラスター)、V2+He (複空孔にヘリウム原子を一つ充てんしたもの)、V2+2He (複空孔にヘリウム原子を二つ充てんしたもの) の欠陥構造について計算を行った。V18 構造 (空孔クラスター) では実験結果を全く再現しない。V2 構造では、3mrad 以下の低運動量領域で強度

が強く、それ以上の領域で弱くなり実験結果と一致しない。複空孔にヘリウムを充てんしたモデルでは、低運動量領域で実験結果に近くなるが、全運動量領域においてもよく実験を再現する欠陥構造は V2+He であり、これが欠陥構造として支配的であると結論付けることができた。

このように EBIC 法・陽電子法ともに欠陥領域でコントラストが発現した。さらに EBIC 測定のみでは判別できないコントラストの原因が、陽電子マイクロビームを用いた陽電子測定により欠陥構造が推定できることが分かった。これは誘起電流減少を引き起こす再結合中心が、空孔型欠陥と関連があることを直接的に示唆している興味深い結果である。半導体では電氣的、光学的特性を劣化させる要因の解明が重要であるが、それらはバンドギャップ中の欠陥準位であるため、構造欠陥という観点からの評価では、欠陥準位というエネルギーレベルに関する直接的な関連を得ることは難しい。今後、DLTS 測定のようなエネルギーレベルと関連付けられる測定を行うことによって、従来直接的に結び付けることができなかった欠陥準位と欠陥構造をより直接的に結びつけることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

M.Maekawa and A. Kawasuso, JAEA-Review 査読有、2012-046(2012)140.

M.Maekawa and A. Kawasuso, JAEA-Review 査読有、2013-059(2013)146

M.Maekawa and A. Kawasuso, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、vol. 443, 2013, 012041(1-4)

M.Maekawa and A. Kawasuso, JAEA-Review 査読有、2014.

〔学会発表〕(計 5 件)

前川雅樹、河裾厚男、第 6 回高崎量子応用研究シンポジウム、2011 年 10 月、高崎シテイギャラリー(群馬)

M. Maekawa and A. Kawasuso, 16th International Conference of Positron Annihilation, 2012 年 8 月、ブリストル大学(英国)

前川雅樹、河裾厚男、応用物理学会、2012 年 9 月、愛媛大学(愛媛)

前川雅樹、河裾厚男、第 7 回高崎量子応用研究シンポジウム、2012 年 10 月、高崎シテイギャラリー(群馬)

前川雅樹、河裾厚男、第 8 回高崎量子応用研究シンポジウム、2013 年 10 月、高崎シテイギャラリー(群馬)

〔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〕

ホームページ等

http://www.taka.jaea.go.jp/asrc/positron/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川雅樹(MAEKAWA MASAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：10354945

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし