

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420285

研究課題名(和文)次世代半導体デバイスのための不純物分布計測技術の開発

研究課題名(英文)Development of dopant concentration measuring technique for next generation semiconductor devices

研究代表者

田中 成泰(TANAKA, Shigeyasu)

中部大学・生命健康科学部・教授

研究者番号：70217032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：半導体デバイスの開発には、静電ポテンシャルを制御することが必要で、これは不純物の種類や濃度を変化させることで実現する。新しくデバイスを開発する時、不純物が設計どおりに制御できているか調べる必要がある。しかし、デバイスの微細化が進む中、そのような手法の開発が遅れている。本研究では、電子ビームを照射したときに流れる電流を測ることで、不純物濃度を分析する手法の開発を目指した。電子顕微鏡を使って行う手法であり、空間分解能は非常に高く出来、濃度に応じて誘導電流が変化することを確認出来た。しかし、そのために試料を加工する必要がある。試料作製法を改良することで、より信頼できる手法になると期待される。

研究成果の概要(英文)：The function of semiconductor devices are controlled by electrostatic potential, and potential is controlled by changing the species and concentrations of the dopants. In developing new devices, it is often necessary to examine the dopant concentration. Today, the development of such technique is behind the needs, so this investigation aims at developing such technique. In this study, electron beam induced current(EBIC) was used to detect the dopant concentration. This technique is combined with an electron microscope, so high spacial resolution is expected. The results clearly showed that EBIC varied with the dopant concentration. However, there is a difficulty in this technique. That is preparation of the samples. With improved preparation technique, this method must be much reliable.

研究分野：電子顕微鏡学

キーワード：電子線誘起電流 EBIC SEM 不純物濃度 シリコン

### 1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの製造に必要な評価技術として、不純物濃度分布の評価法の開発を目的とする。半導体デバイスの微細化・高密度実装技術の開発において、加工技術のカウンターパートとなる評価技術の開発が遅れており障害となりつつある。中でも不純物分布の評価技術の開発は極めて重要である。従来より様々な手法が開発されているが、半導体製造技術の進展に追いついていない。本研究では、従来検討されたことのない低加速電圧の電子線を用いた電子線誘起電流を利用することで、散乱や拡散によるボケを抑え、高い空間分解能と定量性を狙う。

### 2. 研究の目的

エレクトロニクスデバイスの高性能化に対する要求はますます高まりつつあるが、その一方で環境・エネルギーの点から消費電力の低減も急務となっている。こうした課題に対して産業界ではデバイスの微細化・高密度実装技術の開発を進めており、基本加工寸法は2016年には22nmに達すると予想されている。これに対して、加工技術のカウンターパートとなる評価技術においては、加工寸法より約1桁高い精度が要求されるが、十分な見通しが得られておらず、ナノスケールデバイス開発の障害となりつつある。次世代デバイス開発のために必要となる各種評価技術の中でも最も切望されているものの一つがナノスケール分解能での半導体内の不純物分布(ドナー、アクセプターの濃度分布)を定量的に評価する技術である。本研究では、電子線誘起電流法(EBIC)と走査型顕微鏡(SEM)を組み合わせ、半導体デバイス内の不純物分布のナノスケール分解能を有する評価技法の開発を目指す。SEM-EBIC法は、接合の形態を評価する方法として研究された例はあるが、励起された少数キャリアの拡散が関与する方法であるという認識があり、高い空間分解能での観察を目指した研究例は少ない。本研究では数kV以下の低加速電圧を用いて電子ビームの散乱による広がりを小さくする。また、電子ビームは、試料に形成したショットキー接合中の空間電荷領域に入射して、この領域の中だけで少数キャリアを励起することで、少数キャリアの拡散による広がりを抑える。これらの効果により、5nm程度以下の空間分解能を目指す。

### 3. 研究の方法

薄片化した試料表面上で細く絞った電子ビームを走査し、試料表面から出る2次電子を検出、その強度を走査信号と同期して画像として表示する方法がSEM法であり、試料表面の凹凸構造が観察できる。これと同時に試料を流れる電流を検出し、その強度で画像を作成する方法がSEM-EBIC法である。本研究では、試料としては表面にショットキー接合が、裏面にはオーミック電極が形成された薄

片化試料を用い、低い加速電圧でEBICを観察することで不純物濃度分布計測法の開発を目指す。本手法では空乏層の幅が不純物濃度により変わることを利用している。電子ビームの加速電圧を調整して、試料中の電子の広がりを幅が広い方には収まるが、狭い方に対しては大部分が外に出てしまうようにしてビームを走査してやると、空乏層に含まれる電子数(少数キャリア数も)が大きく異なるため、不純物濃度(空乏層幅)に応じてEBIC電流が変化する。加速電圧を色々変えてEBICを測定し、EBICの変化する位置を求めて解析することで、不純物濃度分布を推定することができる。p,nの区別はEBICの極性で判別できる。空間分解能は、不純物濃度、即ち空乏層の幅に依存し、高い不純物濃度ほど高い空間分解能が期待できる。例えば不純物濃度 $\sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ の場合、空乏層幅は10nm程度であるので、空間分解能は5nm程度が期待できる。

### 4. 研究成果

本研究では、試料としてp-型のシリコンを用いた。シリコンには、表面からのイオン注入により予め深さ方向に濃度分布を形成してあり、その分布がEBICを用いて再現出来るかが研究のポイントである。EBICの実験にあたりTEM試料作製の要領でface-to-faceで貼り合わせ、図1のように楔形に加工した。この後、一方の面にはTiを蒸着してショットキー電極を形成し、他方にはAlとAuによりオーミック電極を形成した。実験としては、ショットキー側から電子線を入射させる方法とオーミック側から電子線を入射させる方法があるが、本研究ではその両方を実験し検討した。

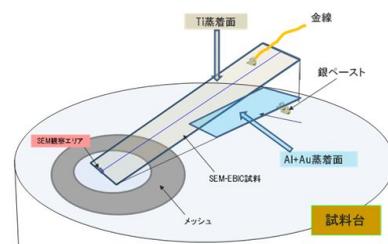


図1 試料の形状

本研究の試料構造では、いずれの場合も電子線は、試料断面に入射させることになる。入射面がショットキーの場合は、その直下に空乏層があり、その幅がその場所の不純物濃度で決まることになる。電子の散乱領域の広がりが空乏層の中に入ってしまうと、大きなEBICが流れ、逆に空乏層の幅よりも散乱領域が広ければEBICが少なくなるので、EBICより空乏層幅が推定できる筈であり、したがって、不純物濃度が推定できる筈である。

実験に先立ち本研究で使用したシリコン

の不純物分布の場合どのような EBIC 信号が得られるかシミュレーションを行った．結果の一例を図 2 に示す．

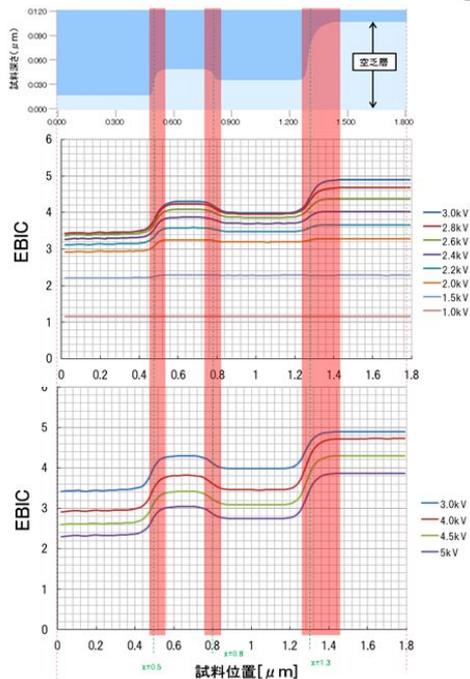


図 2 EBIC シミュレーション結果

最上段は，深さ方向の濃度分布を空乏層の幅で表している．中段，下段は各加速電圧における EBIC を表している．低加速電圧の場合，試料への侵入長が浅いので，空乏層の変化が浅いところで起きる（高濃度）場合のみ EBIC のステップ変化として現れる．加速電圧の高い場合は，空乏層が深いところで変化しても（低濃度）EBIC のステップ状変化が見られるが，ダレが大きいことが分かる．これは加速電圧が高くなると散乱領域の広がりが大きくなるためである．

図 3 には実験結果の例を示す．上段は SEM 像で，接着層界面は face-to-face で貼り合わせた面である．この試料では左右で先端の位置が異なり，左側は楔の（一番薄い）先端部分が白っぽく見えている．下段は対応する EBIC 像である．ほとんどの領域で白く見えるが，これはイオン打ち込みが無く，不純物濃度が低いので，空乏層幅が広いためである．試料先端部は黒く見えるので，EBIC が流れないことを示しているが，これは先端部全体が空乏化しているためだと思われる．また，先端部を SEM 像と EBIC 像で比較してみると表面近傍の濃度が変化している部分に対応して EBIC の先端位置が変わっているのが分かる．このことは，EBIC 像の試料先端位置の変化より濃度分布が推定できることを示している．また，本来の試料表面近傍も，高不純物濃度を反映して暗いコントラストを呈している．そこで，EBIC の強度分布を濃度分布と比較した（図 4）．

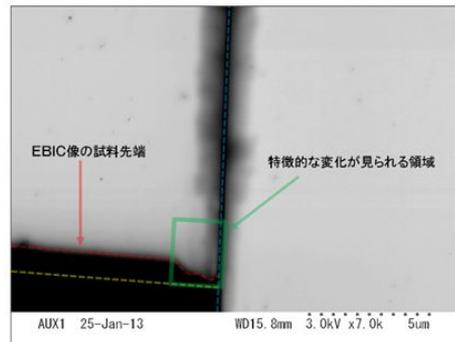
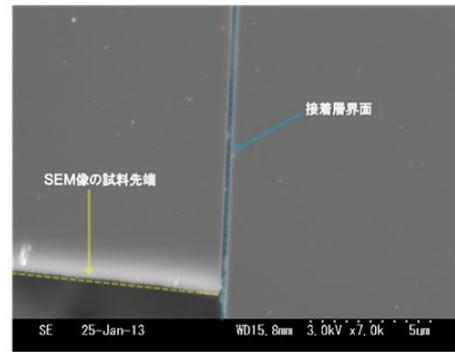


図 3 観察結果の例

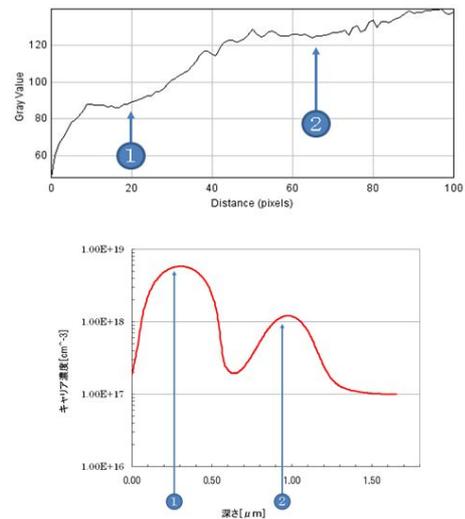


図 4 EBIC プロファイル(上段)と濃度分布(下段)

図 4 上段は，EBIC 像で特徴的な変化が見られる表面付近の深さ方向のラインプロファイルである．下段は，深さ方向の不純物濃度分布である．両者を比較すると，濃度が高く空乏層幅が薄い場所で EBIC が少なくなっており，予想と一致した結果であった．しかし，図 3 の EBIC を見て分かるように，接着剤界面付近では，暗いコントラストが大きく広がっている．これは，研磨の際に接着剤が広がってしまったことによると考えられる．

face-to-face 試料を作製する際に接着剤を出来るだけ少なくして作製する事が必須である。

オーミック側から電子線を入射したときの SEM 像と対応する EBIC 像を図 5 に示す。

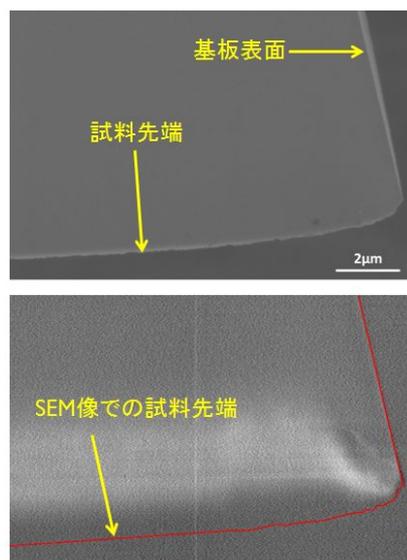


図 5 SEM 像（上段）と対応する EBIC 像（下段）

コントラストは、ショットキー側入射と比べてほぼ反転している。この場合も、試料先端は空乏化していて EBIC は流れない。基板表面付近は、濃度が変化しているの、明るい帯状領域の位置が変わっているのが分かる。

以上のように、不純物濃度に応じた EBIC の変化を得ることは出来たが、より精密な解析をするには、試料の作製をより緻密にする必要があり、この点が今後の課題として残っている。

## 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)

[雑誌論文](計 3 件)

SEM observation and analysis of InGaN/GaN multiple quantum well structure using obliquely polished sample, S.Tanaka, T.Karumi, Microscopy 66, pp.131-135, 2017, 査読あり  
doi: 10.1093/jmicro/dfw101

A simple way to obtain backscattered electron images in a scanning transmission electron microscope, H.Tsuruta, S.Tanaka, T.Tanji, C.Morita, Microscopy 63, pp.333-336, 2014, 査読あり  
doi.org/10.1093/jmicro/dfu017

Observation of potential distribution in

GaN-based devices by scanning electron microscope, T.Karumi, T.Tanji, S.Tanaka, Microscopy 63, pp.i22-i23, 2014, 査読あり  
doi: 10.1093/jmicro/dfu051

[学会発表](計 7 件)

A simple way to obtain backscattered electron images in a scanning transmission electron microscope, H.Tsuruta, S.Tanaka, T.Tanji, IMC-2014, 2014 年 9 月 11 日, Prague, Czech Republic.

An attempt to visualize dopant distribution in Si by low-voltage SEM-EBIC, S.Tanaka, T.Niwa, T.Tanji, IMC-2014, 2014 年 9 月 10 日, Prague, Czech Republic.

電子線ホログラフィ法による窒化物半導体超格子内のピエゾ電界の解析, 長尾, 田中, 丹司, 天野, 平成 26 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2014 年 9 月 9 日, 中京大学(愛知県, 名古屋市).

走査型電子顕微鏡による半導体ポテンシャル分布の観察, 軽海, 田中, 丹司, 天野, 平成 26 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2014 年 9 月 9 日, 中京大学(愛知県, 名古屋市).

STEM 用試料ホルダー組み込み型の反射電子検出器(2), 鶴田, 田中, 丹司, 森田, 日本顕微鏡学会第 70 回学術講演会, 2014 年 5 月 11 日, 幕張メッセ(千葉県, 千葉市).

BSE detector incorporated in STEM sample holder and its application, H.Tsuruta, S.Tanaka, T.Tanji and C.Morita, 9th Int. Symp. on Atomic Level Characterization for New materials and Devices '13, 2013 年 12 月 3 日, Hawaii, USA.

低加速電圧 SEM-EBIC によるシリコン中のドーパント濃度の可視化, 丹羽, 田中, 軽海, 丹司, 日本顕微鏡学会第 69 回学術講演会(招待講演), 2013 年 5 月 21 日, ホテル阪急エクスパーク(大阪府, 吹田市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 成泰 (TANAKA, Shigeyasu)  
中部大学・生命健康科学部・教授  
研究者番号: 70217032

### (4) 研究協力者

丹羽 辰嗣 (NIWA, Tatsuji)  
手島 基裕 (TEJIMA, Motohiro)  
軽海 貴博 (KARUMI, Takahiro)  
長尾 俊介 (NAGAO, Shunsuke)