

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560296

研究課題名(和文) 次世代デバイス評価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 measurement technique for next-generation devices

研究代表者：

田中 成泰 (TANAKA SHIGEYASU)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：70217032

研究成果の概要(和文)：pn接合の断面試料を用いたSTEM-EBIC観察では、試料厚みが薄くなると拡散の効果が抑えられ、空乏層に対応するEBIC信号の幅が狭くなった。しかし、厚み0.1 μ m以下になると急激にEBIC信号が弱くなり、実際上検出できなくなってしまった。これは、試料表面の空乏化が原因と考えられる。試料表面にショットキー電極を設けた構造では、EBIC電流から不純物濃度分布が空間分解能10nm以下で推定可能であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：For cross-sectional observations using p-n junction samples, the width of the depletion region decreased as the thickness decreases. This is due to the reduced diffusion length. But for regions thinner than about 0.1 μ m, the EBIC signal intensity starts to decrease quickly as the sample thickness decreases, and disappears. This is probably due to a presence of a surface depletion region. Cross-sectional samples on which Schottky contact was placed were also analyzed. It was shown that dopant distribution can be reproduced with accuracy better than 10nm from the EBIC current.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：作成・評価技術、電子顕微鏡、半導体、電子線誘起電流

1. 研究開始当初の背景

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2012年には35nm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、まだ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なか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を定量的に評価する技術である。

これまで不純物の評価には二次イオン質量分析法(SIMS)が用いられてきたが、もともとSIMSは一次元的な測定手法であるため、面内の空間分解能を高めることは非常に困難であり、現在では50nm程度にまで高まったものの、感度低下などの問題が指摘されている。また、走査プローブ顕微鏡を用いて

容量や表面電位を測定する方法が研究されている。このうち容量測定の方法は、十分な空間分解能を得るのが難しい。表面電位測定の方法は、非常に高い空間分解能が得られ表面の不純物原子1個1個が区別され観察されている。この手法は、空間分解能の高さを示すデモンストレーションとしてはインパクトが高いが、内部の不純物分布が得られない点が難点であると思われる。別の手法として、透過電子顕微鏡法に基づく電子線干渉（電子線ホログラフィ）を用いた方法が試みられている。この手法では、試料内部の電位が測定されるが、測定される電位は薄片化試料の膜厚や表面状態に大きく依存するので、測定電位の精度が課題である。このようにナノスケール分解能で不純物分布を定量的に評価する技術として確立された方法はまだない。

2. 研究の目的

本研究では、電子線誘起電流法（EBIC）と走査型透過電子顕微鏡（STEM）を組み合わせて、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。STEM-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ので、高い空間分解能での研究例はない。本研究では10nm程度以下の薄膜を用いることで電子ビームの広がりや少数キャリアの拡散を抑え、5nm程度以下の空間分解能を目指す。

3. 研究の方法

- (1) 薄片化した断面試料から EBIC 電流を取り出すための電子顕微鏡用ステージおよび試料取付け方法を開発する。
- (2) 弱い EBIC 信号を検出するために同期検出システムを開発する。電子ビームをチョップし、これと同期して流れる EBIC 信号を同期検出できるようにする。
- (3) EBIC のシミュレーションプログラムを作成して実験結果を検討するとともに、空間分解能の可能性について検討する。

4. 研究成果

STEM-EBIC 像観察は断面方向から行う。このためには、通常の断面 TEM 試料のような薄片化試料から EBIC 電流を取り出す必要がある。新たな試料取付けジグを考案することで、ハンドリングの過程で試料を破損することの少ない薄片化法を開発した。これにより通常の断面 TEM 試料作製と変わらない時間で EBIC 用の試料作製が出来るようになった。図1には、実際に試料を取り付けた状態の EBIC 用の試料ホルダーの先端部を示す。



図1 EBICホルダー先端部

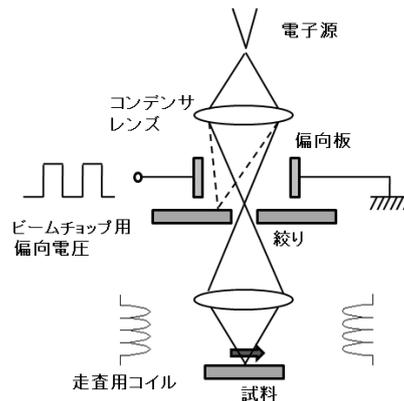


図2 電子ビームチョッピング法

電子ビームのチョッピング方法の概略を図2に示す。走査型透過電子顕微鏡のコンデンサ絞りの位置に偏向板を設置し、そこに高電圧矩形パルスを印加する。STEMのビーム走査中にビームをチョッピングすることでビーム on、ビーム off の状態をつくり、これと同期して流れる EBIC 電流をロックインアンプで同期検出した

n型シリコン（抵抗率 0.1-1Ωcm）にボロンをイオン注入、表と裏にオーミック電極を形成して EBIC 実験用の pn 接合テスト基板を作製した。その後、通常の断面 TEM 試料作製方法と同様の方法で試料を薄片化した。まず、ダミーのシリコン基板と表面同士を接着剤で貼り合わせ、適当な大きさに切断した後、機械研磨、ディンプルグラインダーによる研磨、最終イオン研磨の順で薄片化した。薄片化の後、試料を EBIC 用のジグに取り付け、EBIC 観察に用いた。図3には STEM 暗視野像と対応する EBIC 像を示す。図3(a)において、左側が pn 接合試料で表面から 1μm 程度が p 型層である。右はダミー基板で、その間の黒い帯は接着剤である。EBIC 像には pn 接合試料の表面近傍に明るい帯が見られるが、ここに空乏層があるためである。帯の幅は上に行くほど狭くなるが、これは厚みの効果で、実効的に拡散長が短くなっているからである。しかし、ある程度試料厚みが薄くなると、

EBIC 信号が取れなくなっている。これは表面空乏化のために薄い領域では実質的に pn 接合が消失してしまっていることによると考えられる。

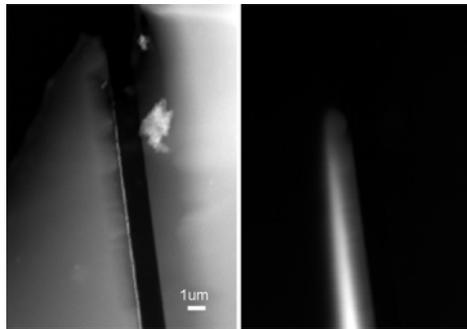


図3 (a) STEM 像、(b)EBIC 像

図4には0.1 μm厚の領域におけるEBIC電流のラインプロファイルと、表面再結合速度(Sv)を変えて計算したシミュレーションによるEBIC電流のプロファイルを示す。この図には、接合による電界も一緒に示してある。p領域は表面に近いので、計算によるEBIC電流はSvにあまり依存しない。一方、n領域ではSvに強く依存し、 $Sv=5 \times 10^4$ cm/secのときに実験と良く一致していることが分かる。

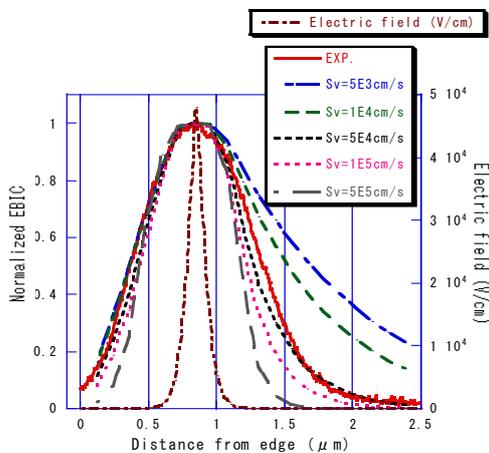


図4 0.1 μm厚の領域におけるEBICのラインプロファイルとシミュレーションによるプロファイル

図5には、 $Sv=5 \times 10^4$ cm/secのときのいくつかの膜厚に対して計算したEBIC電流のプロファイルを示す。p領域は表面に近いため、膜厚にEBIC電流のプロファイルの違いはほとんど無い。一方、n領域では、膜厚が薄くなるにしたがってEBIC電流の減少の度合いが強くなっている。しかし、0.1 μmにおいてもEBIC電流の減少の度合いは緩やかで、接合の位置を正確に特定するのは難しい。しか

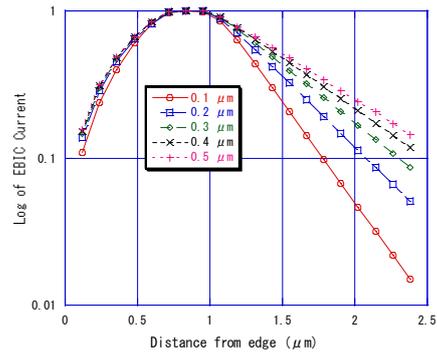


図5 いくつかの膜厚に対するEBIC電流の計算によるプロファイル

しながら、膜厚を0.1 μm以下の領域は、前述のように空乏化されてしまっていて実際上接合は存在しない。したがって、通常の断面観察によるEBICでは、目標としているような高分解能の不純物濃度分布を得ることは難しいと考えられる。

次にpn接合の断面試料表面にショットキー接触を形成した構造について検討した。裏面にはオーミック電極を形成し、EBIC電流は平面試料と同じく、表裏の電極を流れる。この構造では、p領域とn領域ではEBIC電流の向きが異なり、極性によってpnの区別ができる。また、EBIC電流は空乏層の幅で決まるので、不純物濃度分布がEBIC電流より直接的に求めることができる。さらに薄い試料を用いることで、拡散によるボケ量を小さく抑えることができる。このボケ量は、実効的な拡散距離である膜厚に依存するが、ボケた像は実効拡散距離と構造の畳み込み積分で表される。したがって、デコンボリューション処理することで容易に元の構造が再現できる

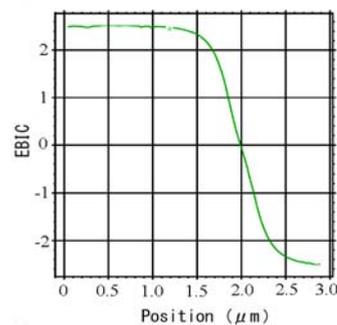


図6 0.8 μm厚のpn接合試料についてのEBIC電流シミュレーション

図6には0.8 μm厚のpn接合試料についてのEBIC電流プロファイルのシミュレーション結果を示す。接合の位置は2 μmにあり、空乏層幅はおよそ0.4 μmの場合についての結果である。p、nの不純物濃度は両方とも 3×10^{16} cm⁻³を仮定している。図4の場合に比

べて膜厚が厚いにもかかわらず、接合の幅のボケは小さくなっているのが分かる。

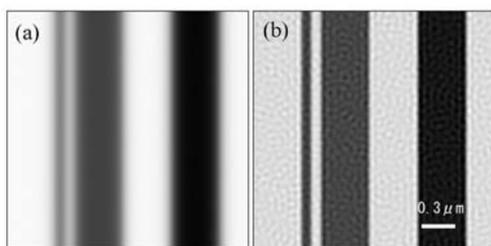


図7 (a) 元の構造を $0.04\mu\text{m}$ ぼかした後に5%のノイズを加えた像。(b) (a)をデコンボリューションした像。

図7は、EBIC像のボケの回復の程度を検討するために行ったシミュレーションの結果である。元の構造は不純物濃度 10^{17}cm^{-3} の母層の中に幅が $0.1\mu\text{m}$ の 10^{18}cm^{-3} の層、 $0.5\mu\text{m}$ の 10^{18}cm^{-3} の層、 $0.5\mu\text{m}$ の 10^{19}cm^{-3} の層があり、それぞれ、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 離れている。膜厚は $0.1\mu\text{m}$ を仮定している。(a)はこの元の構造を拡散によるボケとして $0.04\mu\text{m}$ ぼかし、さらに EBIC 測定時の統計ノイズとして5%のノイズを加えたものである。各層の明るさの違いは、不純物濃度の違いによる空乏層幅の違いを反映している。(b)は、(a)の像をデコンボリューション処理したものである。層の境界が明瞭になっており、解像度が上がっているのが分かる。ラインプロファイルを調べた結果、ボケ幅は 10nm 程度であった。また、像の強度は、元の不純物濃度を反映しており、不純物濃度が $10^{17} - 10^{19}\text{cm}^{-3}$ では定量的な評価ができることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

(1) S. Tanaka, H. Tanaka, T. Kawasaki, M. Ichihashi, T. Tanji, K. Arafune, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, EBIC imaging using scanning transmission electron microscopy: experiment and analysis, Journal of Materials Science-Materials in Electronics, **19**(2008)S324-S327.

(2) M. Deguchi, S. Tanaka, T. Tanji, Determination of Piezoelectric Fields Across InGaN/GaN Quantum Wells by Means of Electron Holography, Journal of Electronic Materials, **39**(2010)815-818.

〔学会発表〕(計6件)

(1) S. Tanaka, M. Deguchi, T. Tanji, Characterization of a-Si/c-Si Junctions by Electron Holography, The 9th Asia-Pacific Microscopy Conference, Nov. 2-7, 2008, Jeju, Korea

(2) S. Tanaka, M. Deguchi, T. Tanji, Determination of Piezoelectric Fields across InGaN/GaN Quantum Wells by Means of Electron Holography, 13th Int. Conf. on Defects Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors, Sep. 13-17, 2009, Wheeling, USA

(3) T. Niwa, S. Tanaka, T. Tanji, Application of Electron-Beam-Induced-Current Technique in Scanning Transmission Electron Microscope to Observation of Si p-n Junction, International Microscopy Congress 17, Sep. 19-24, 2010, Rio, Brazil

他3件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 成泰 (TANAKA SHIGEYASU)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授
研究者番号：70217032

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

出口 将士 (DEGUCHI MASASHI)
(平成20年4月～平成21年3月)
名古屋大学大学院工学研究科

櫛田 拓也 (KUSHIDA TAKUYA)
(平成21年4月～平成23年3月)
名古屋大学大学院工学研究科

丹羽 辰嗣 (NIWA TATSUSHI)
(平成21年4月～平成22年9月)
名古屋大学大学院工学研究科