

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：83906

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420671

研究課題名(和文) パワーデバイス開発のための金属/半導体界面におけるその場電位分布解析

研究課題名(英文) In-situ analysis of potential distribution around interfaces between metals and semiconductors for the development of power devices

研究代表者

加藤 丈晴 (KATO, Takeharu)

一般財団法人ファインセラミックスセンター・その他部局等・主任研究員

研究者番号：90399600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：金属/半導体界面に電圧印加するため、アルミナとチタン薄膜を用いたTEM試料支持体を作製した。その支持体に、金属/半導体界面を有する部位を固定した。金属半導体界面を均一厚さで、損傷の無いTEM観察試料を仕上げる技術および、金属/半導体界面に電圧印加する配線技術を確立した。金属/半導体界面に、順バイアスおよび逆バイアスを印加し、電流-電圧測定を行った。さらに、電子線ホログラフィー観察による金属近傍の半導体内部における電位分布の変化から、印加電圧と空乏層厚さの関係を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：In order to apply electric voltage to the interface between the metals and semiconductors, supports of TEM samples composed of an alumina plate and titanium foils was fabricated. Samples including the interface between the metals and semiconductors were fixed on the edge of the supports. We developed TEM sample preparation technique with uniform thickness and no damage, and electrical wiring technique applying electrical voltage to the interface between the metals and the semiconductors. Current-voltage characteristics were measured from the above TEM samples applying the forward bias or reversed bias. The relationships between the applying voltages and the thickness of depletion layers could be clarified using electron holography, which could indicate the potential distribution in the semiconductors at the vicinity of the metals interface.

研究分野：工学

キーワード：電位分布 ショットキー障壁 金属/半導体 空乏層 電子線ホログラフィー

1. 研究開始当初の背景

パワーデバイス分野ではシリコンに代わり省エネ化、さらに、低損失デバイス実現のため、炭化ケイ素(SiC)、窒化ガリウム(GaN)等のワイドギャップ半導体の開発が行われている。ワイドギャップ半導体では、デバイス通電状態でのオン抵抗値は、原理的に従来のシリコン半導体と比較し約2桁低くなると予想されている。しかしながら、これまでのSiCおよびGaN等の化合物半導体を素子として動作させるための金属電極開発は、半導体上に多様な組成の合金層を形成し、様々な条件で熱処理を行うことにより、ショットキー障壁を小さくし、オーミックコンタクトを実現している。そのため、これまでの電極開発には多大な労力と時間が必要であった。また、金属電極のどのような組成および構造がオーミックコンタクトを可能にしているか否か、不明なまま開発が進む場合も少なくない。さらに、将来的にデバイス素子は小さくなる(1 μ m以下)ことが予想され、局所領域の計測技術が不可欠になる。透過型電子顕微鏡(TEM)による材料の微細構造解析はサブナノオーダーさらに、原子分解能での空間分解能を有し、局所的な組成分析も同時に実施することが可能である。さらに、局部へ電圧を印加できれば、電子線ホログラフィー観察から、金属電極近傍の半導体内部における電位分布を解析し、ショットキー障壁およびキャリアの移動度に密接に関係がある空乏層厚さを定量的に評価することは原理的に可能である。以上の手順を踏まえば、金属電極の構造と半導体内部のショットキー障壁との関連を明らかにすることが期待できる。従って、本研究が目指す金属界面近傍の半導体内部の電位分布をその場観察することにより、パワーデバイスに必要な電極開発に重要な指針を与えることができると考えられる。さらに、化合物半導体では、転位、積層欠陥、マクロパイプ等の欠陥形成を極力抑える努力がなされているが、現状ではSiCで $10^3 \sim 10^4/\text{cm}^2$ 、GaNで $10^6/\text{cm}^2$ 程度の欠陥密度である。これらの欠陥にはリーク電流が流れ、欠陥密度とデバイスの歩留まりとの関連が知られている。欠陥構造と電気特性との関連は、模式図として示されているものの、直接観察もしくは、直接測定した報告は皆無と思われる。パワーデバイスを設計する上でキラ欠陥となる構造とそうでない欠陥構造とを識別することは、極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究は、金属/半導体界面を有するTEM観察試料に電圧印加するための局所配線技術を確立し、かつ、金属/半導体界面に電圧印加しながら、電子線ホログラフィー観察を併用し、金属電極近傍の半導体内部の電位分布変化をその場観察する技術開発を目的とする。また、電子線ホログラフィー観察の電位分布解析から、空乏層厚さを定量的に解析す

る。さらに、電子線ホログラフィー観察から、半導体内部に形成された転位等の欠陥近傍の電位分布測定を行い、電流-電圧特性から欠陥構造と電気的特性との関連を明らかにし、パワーデバイス設計に重要な知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

シリコン半導体上にチタン金属電極もしくは、アルミニウム電極を形成し、電気測定(I-Vカーブ)を行い、バルク状態での電気特性を把握した。集束イオンビーム(FIB)-マイクロサンプリング法により金属電極を形成した半導体から微小サンプルを抽出した。TEM試料へ電圧印加するため、チタン薄膜とアルミナプレートを組み合わせた支持体を作製し、チタン薄膜の端に微小サンプルを固定した。その後、金属電極/半導体界面をTEM観察できるようにFIB法により薄片化を行った。さらに、薄片化領域のFIBダメージ層を除去するため、アルゴンイオンビームを照射した。以上のように仕上げた金属電極/半導体試料に、順バイアスもしくは、逆バイアスを印加し、金属電極近傍におけるシリコン半導体内部の電位分布を電子線ホログラフィーにより評価した。

4. 研究成果

金属電極/半導体界面に電圧を印加するため、試料固定、配線および、TEM観察試料薄片化行程を確立した。まず、絶縁体である板状のアルミナの上にチタン薄膜を固定する。FIB装置内部で、金属電極表面にタングステンを蒸着し、FIB-マイクロサンプリング法により金属電極/半導体試料を抽出し、タングステン蒸着によりアルミナ上のチタン薄膜の端に抽出した試料を固定した。抽出したサンプルを電氣的に孤立させるため、チタン薄膜をFIBにより切断した。その後、FIBにより薄片化を実施するが、均一なTEM観察試料に上げるため、Gaイオンビームの照射滞在時間を10 μ sにした。加速電圧は40kVから開始し、最終段階では、観察試料を $\pm 3^\circ$ 傾斜させて、加速電圧1kVのGaイオンビームを照射した。このような試料に対し、加速電圧1~0.5kVのアルゴンイオンビームを照射することによりGaイオンビームで形成されたダメージ層を除去した。

電圧印加用のTEM観察試料について、電子線トモグラフィー法を用い、金属電極/半導体界面領域の試料厚さに、ほぼ変化が無く、均一厚さに仕上がっていることを確認した。

以上のような金属/半導体界面を有し、電圧印加可能なTEM観察試料に、順バイアスもしくは、逆バイアスを印加し、電流-電圧測定をおこなった。さらに、電子線ホログラフィー観察から、金属電極/半導体界面の電位分布を計測した。金属電極近傍の半導体内部

における電位分布の変化から、空乏層厚さと印加電圧との関連をとらえることができた。電位分布については薄片化した試料の厚さを見積もることにより定量的な評価も可能であった。

半導体内部に格子欠陥を有する金属/半導体サンプルについても、電子線ホログラフィーを用いて同様な電位分布評価を試みたが、欠陥および欠陥近傍の回折コントラストの影響のため、半導体内部の電位分布を正確に評価することができなかった。そのため、格子欠陥およびその近傍のコントラストの影響を極小化するため、2軸傾斜可能なホルダーを用いて、実験を遂行することが必要である。

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4件)

I. Matsui, Y. Takigawa, D. Yokoe, T. Kato, T. Uesugi, K. Higashi, "Strategy for Electrodeposition of Highly Ductile Bulk Nanocrystalline Metals with a Face-Centered Cubic Structure" *Mater. Trans.*, **55**, No. 12, pp1859-1866 (2014).

C. Chen, Z. Wang, T. Kato, N. Shibata, T. Taniguchi, Y. Ikuhara "Misfit accommodation mechanism at the heterointerface between diamond and cubic boron nitride" *Nature communications*, vol. 6, 6327 (2015).

谷口尚、陳春林、加藤丈晴、柴田直哉、幾原雄一、"ダイヤモンドと立方晶窒化ホウ素単結晶の接合界面の創成と評価" セラミックス、51、No.2、pp94-97 (2016).

S. Kitaoka, T. Matudaira, T. Yokoi, D. Yokoe, T. Kato and M. Takata, "Structural Stability Design under Oxygen Potential Gradients at High Temperatures" *AMTC Letters*, Vol. 5 204-205 (2016).

[学会発表](計5件)

T. Hamanaka, T. Kato, A. Takeno, T. Hirayama "Microstructural Characterization of Craze Polypropylene Film by Scanning Electron Microscopy" The 4th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC4)(2014)

鈴木隆文、曾布川栄太郎、高橋知里、佐々木勝寛、吉田竜視、加藤丈晴、徳永智春、山本剛久 "電気化学反応のその場観察の試み" 日本顕微鏡学会第70回記念学術講演会

(2014)

S. Kitaoka, T. Matudaira, T. Yokoi, D. Yokoe, T. Kato and M. Takata, "Structural Stability Design under Oxygen Potential Gradients at High Temperatures" 5th International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations (AMTC5) (2016).

S. Kitaoka, T. Matsudaira, M. Wada, N. Kawashima, D. Yokoe, T. Kato and M. Takata, "Mass-transfer Mechanisms in Yb-silicate under Oxygen Potential Gradients at High Temperatures" 9th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HTCMC-9) (2016).

小林俊介、加藤丈晴、幾原雄一、山本剛久、BaTiO₃ 薄膜の陽イオン微小変位計測によるナノドメイン構造解析、応用物理学会第77回秋季学術講演会(2016)。

[図書](計1件)

加藤丈晴、ナノ材料解析の実際(第8章 集束イオンビーム-走査型電子顕微鏡(FIB-SEM))、講談社、105-115(2016)。

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

加藤 丈晴 (KATO, Takeharu)

一般財団法人ファインセラミックスセンター

ナノ構造研究所 主任研究員

研究者番号：90399600

(2)研究分担者

横江 大作 (YOKOE, Daisaku)
一般財団法人ファインセラミックスセンタ
ー
ナノ構造研究所 上級技師補
研究者番号：20590079

吉田 竜視 (YOSHIDA, Ryuji)
一般財団法人ファインセラミックスセンタ
ー
ナノ構造研究所 技師
研究者番号：50595725

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし