

研究種目： 特定領域研究

研究期間： 2007～2011

課題番号： 19054010

研究課題名 (和文) 新規ナノプローブ計測法によるカーボンナノチューブの電気・力学物性評価

研究課題名 (英文) Novel Nanoprobe Method for Investigating of Electrical and Mechanical Properties of Carbon Nanotubes

研究代表者

山田 啓文 (YAMADA HIROFUMI)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 40283626

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： カーボンナノチューブ、原子間力顕微鏡(AFM)、ケルビンプローブ AFM
周波数変調(FM)検出法、高分解能マルチプローブ AFM

1. 研究計画の概要

本研究課題では、周波数変調検出方式の原子間力顕微鏡 (FM-AFM) 法など先進ダイナミックモードナノプローブ法に基づく、新規高分解能ナノプローブ電気・力学計測法を開発し、動作状態にある CNT の電気・力学特性の解析評価技術を確認することを目的としている。

上記目的を達成するために、以下の3つの研究テーマに沿って研究を推進した。

(1) FM-AFM など先進ダイナミックモードナノプローブ法に基づく高分解能ナノプローブ電気物性計測、(2) ナノチューブの電気-力学応答計測、(3) 動的な物性評価のための高分解能マルチプローブ AFM の開発。

2. 研究の進捗状況

(1) FM-AFM など先進ダイナミックモードナノプローブ法に基づく高分解能ナノプローブ電気物性計測：試料の各測定点で、ダイナミックモードによる高精度な試料形状測定と、試料へ接近/接触した状態での試料の電気特性計測を切り替えて行なう、各点 AFM 計測法 (Point-by-point AFM measurement) を新規に開発し、これを AFM ポテンショメトリ (AFMP) および走査型ゲート顕微鏡 (SGM) に応用した (各点 AFMP: P-AFMP, 各点 SGM: P-SGM)。各点 AFM 計測法により、非破壊での試料の電気特性の高精度測定が可能となった。さらに、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) の空間分解能向上を目的に、新たに構築した3次元フォースマップ制御系により、試料上空の任意の空間点において探針に働く静電的相互作用力の試料バイアス依

存性測定から静電的背景力を評価している。(2) ナノチューブの電気-力学応答計測：(1) で述べた各点 AFM 計測法を点接触 (Point-contact) AFM (PC-AFM) に応用し、CNT の電気-力学応答計測を行った。PC-AFM では、探針を試料に接触させた時の接触応力を増加させながら、固定バイアス電圧を加えた状態の CNT の電流変化を測定した。この PC-AFM 測定により、CNT にある値以上の力が加わると急激に CNT が変形するとともに、大きくコンダクタンスが変化することが判明した。

(3) 動的な物性評価のための高分解能マルチプローブ AFM (MP-AFM) の開発：試料の各点で、バイアス電圧を掃引し、任意のタイミングでゲート応答電流像を再構成するストロボ各点走査ゲート顕微鏡を開発し、連続的にゲートバイアスを変化させた時の局所ゲート応答を、CNT の欠陥および電極端に存在するショットキー障壁において測定した。また、同一 CNT で電極間隔を可変にして電気測定するために斜入射光でこの方式 MP-AFM および垂直入射光でこの方式 MP-AFM を開発した。

3. 現在までの達成度

区分：(2) おおむね順調に進展している。

これまでの研究で、動作状態にある CNT の電気・力学特性の解析を可能とする、新規高分解能ナノプローブ電気・力学計測法を開発に成功し、さらには各研究サブテーマの目標についても当初の計画通りに達成されている。一方、研究遂行上の問題点もいくつか生じたが、解決するに十分な見通しを得た。

[動作状態にある CNT 評価のための新規ナ

ノプローブ計測法の開発]: 各点 AFMP、各点 SGM、電気-機械応答計測用 PC-AFM など、CNT デバイスにおける局所的な電子状態・電気伝導計測や欠陥評価を可能とする、新規ナノプローブ電気・機械物性計測法を、研究計画どおりに開発した。これら新規計測法の開発により、探針-試料表面間距離ドリフト由来の測定揺らぎを大幅に低減する、高感度な CNT デバイス評価が可能となった。また、各点 AFMP、各点 SGM および FM-KFM を用いて、作製した CNT デバイスを多角的に評価し、局所電子状態と電気伝導の相関について明らかにした。

[3次元静電気力計測 -KFM の高精度化-]: KFM の空間分解能向上を目的に、新たに構築した 3次元フォースマップ制御系により、試料上空の任意の空間点において探針に働く静電的相互作用力の試料バイアス依存性測定から静電的背景力を評価した。その結果、探針が有限の大きさで、測定対象の CNT サイズの方が小さいことに起因し、測定される CNT の表面電位に対する背景力の影響が予想以上に大きく、KFM による精密表面電位測定を妨げているという問題が明らかとなった。表面電位の距離依存性を空間的に測定し電界シミュレーションを踏まえ補正するという申請当初に考えていた方策だけでは不十分であるので、基板上への電荷トラップを抑制するとともに、3次元バイアスフォースカーブ測定から導き出される探針-試料間の容量成分の情報を合わせて背景力の影響を見積もることを進めている。

[連携研究について]: CNT の構造・電気物性・光学物性・力学物性を他の研究機関と協力して複合評価することを目標にして連携研究を進めているが、各評価に適した試料のサイズや測定時の試料固定方法などが異なるという課題があった。そのため、CNT デバイスを作製した後に AFM による構造・電気物性評価をしてから、CNT が配置されている電極中央部の基板に貫通穴を作製して、他の測定を行うことにした。貫通穴のためのエッチング条件などの確立が難しかったが、ようやく評価試料の作製に目途がついたこともあり、本格的に連携を進めていく予定である。

4. 今後の研究の推進方策

今後の研究では、CNTチャンネル上の電気計測の高分解能化、局所状態密度計測の実現に向けて、これまで開発した測定手法を高度化するとともに、新規ナノプローブ電気計測法の開発を行う。また、ナノプローブ電気計測によるCNTの多角的・複合的な評価を通じて、局所欠陥などの構造由来の局所的な電子状態がデバイス全体の電気特性に与える影響など、微視的電子状態と巨視的電気特性の関係に注目して研究を進める。このため、当初

計画には明記していなかったが、必要に応じて外部の研究者と連携して研究を推進する。新規計測手法の開発においては、AFM装置の高ダイナミックレンジ化やドリフト対策などによる、さらなる分解能向上・測定安定性の向上を図る。その上で、CNTチャンネルの表面電位を正確に測定するために、探針-試料間の容量情報を元に背景静電気力の影響を取り除く手法を検討し、背景力補償ケルビンプローブAFM (FM-KFM)を開発する。また、21年度までに試作・検討を進めてきた、局所状態密度計測が可能なFM-AFM/STM、さらには、ナノデバイスに対しても汎用の電気プローブのように電気特性・物性評価が可能な、独立動作可能な複数のプローブを有するマルチプローブAFMの改良を進める。

連携研究においては、高分解能AFM、TEM、PL等の評価法間で互換性のある評価用CNTデバイスを開発し、同一のCNTデバイス試料を実際に評価・意見交換し、カイラリティや欠陥などの原子レベル構造評価や局所的な電子状態などを多角的に評価する。

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計4件)

1. K. Kaneko, Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, and H. Yamada, "Position Control and Electrical Characterization of Single-Walled Carbon Nanotubes Debundled by Density Gradient Ultracentrifugation", Jpn. J. Appl. Phys., 49, 02BD04 (2010) 査読有
2. Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, and H. Yamada, "Surface Potential Investigation of Carbon Nanotube Field-Effect Transistor by Point-by-Point Atomic Force Microscope Potentiometry", Jpn. J. Appl. Phys., 49, 02BD03 (2010) 査読有
3. T. Nishio, Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, "Piezoresistive properties of carbon nanotubes under radial force investigated by atomic force microscopy", Applied Physics Letters, 92, 063117 (2008) 査読有
4. T. Nishio, Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, "The effect of local polarized domains of ferroelectric P(VDF/TrFE) copolymer thin film on a carbon nanotube field-effect transistor", Nanotechnology, 19, 035202 (2008) 査読有

[学会発表] (計1件)

1. Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada: "Carrier Injection from Schottky Barrier of CN-FETs Investigated by AFM Potentiometry", International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (2008.11.12, Tokyo)

[その他]

<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/jp/research/cnt>