

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20740180
 研究課題名（和文）走査型ノイズセンサの高性能化と半導体中電荷揺らぎの空間分布・周波数分散特性の探求
 研究課題名（英文）Development of a high-performance scanning noise sensor and study on spatial distribution and dispersion characteristic of charge fluctuation in semiconductors
 研究代表者
 河野 行雄 (Kawano Yukio)
 独立行政法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・専任研究員
 研究者番号：90334250

研究成果の概要（和文）：

本研究は、以前開発した量子ホール素子による走査型ノイズセンサの性能を格段に向上させ、この計測技術を量子ホール系における電荷揺らぎの探求に適用することで、実空間・周波数分散の双方における情報を直接的に可視化することを目的として行われた。具体的な成果は以下の3点である。

- ① カンチレバーを介在させることで、高空間分解能化（24nm）を達成した
- ② ①を用いて半導体界面量子ホール系における電荷の局所的な過渡応答を明らかにした
- ③ ①を用いて、グラフェンにおけるポテンシャル分布マッピングに成功した

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this work is to develop a high-performance scanning noise sensor based on a quantum Hall device and to clarify spatial distribution and dispersion characteristic of charge fluctuation in quantum Hall system. The achievements are as follows:

1. The spatial resolution has been improved to 24nm by implementing a cantilever.
2. The improved system has allowed clarifying temporal response of local charge dynamics in quantum Hall system.
3. The improved system has enabled us to image potential distribution in graphene devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：走査型ノイズセンサ、量子ホール効果、グラフェン

1. 研究開始当初の背景

物質中の電荷揺らぎは、そこでの重要な物性を決定づける要因となることがしばしばある。例えば、電子の局在-非局在状態間遷移、電荷密度波のスライディング、量子極限まで達したショットノイズなどの研究から、電子のダイナミックな性質とそれに関連する物性が明らかにされた例がいくつかある。電荷揺らぎを測定する一般的な手段はノイズ測定であるが、通常の電気伝導度測定では、ノイズは“邪魔者”として捉えられ、測定者の意識は、むしろ「ノイズをいかに減らすか」という方向に向かいがちである。ところが、上記の事情から、試料全体の平均量でなく、ノイズの局所的な情報（特に空間分布の周波数分散特性）を明確に測定できる何らかの手法を開発できれば、電荷揺らぎやそこに関係する物性を探求する強力な手段になると期待できる。

電荷の局所的な振る舞いを測定するデバイスとして、単電子トランジスタ (SET) によるエレクトロメータが知られている。これまでに、半導体物性研究分野において、SETを半導体表面に蒸着で作製し、局所的な電荷揺らぎを調べた報告がいくつかある（例えば、T. M. Buehler *et al.*, *J. Appl. Phys.* **96**, 6827 (2004).）。ところが、この測定法では、SETを走査することができないため、電荷揺らぎの試料全体にわたる空間分布を観測することができない。SETを走査できるシステムを開発した例が1件ある (M. J. Yoo *et al.*, *Science* **276**, 579 (1997).) もの、そもそもSETエレクトロメータは、明瞭なクーロン振動の観測が前提条件となるため、極低温 (0.3K以下) での使用に限られ、さらに、特別な回路 (RF 回路) を組まない限り、時定数が遅く高速検出が不可能というボトルネッ

クがあった。

これらの問題を解決するために、われわれは以前に、量子ホール素子のユニークな性質を利用した新しい走査型エレクトロメータを開発した。さらにこれを用いて、同じく量子ホール状態にある半導体試料における低周波域 (1kHz) の $1/f$ ノイズイメージングに、世界で初めて成功した。この一連の成果は、Applied Physics Letters 誌 2月16日号の表紙に採択 (2004年)、日本物理学会シンポジウム講演 (2005年)、7th International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures/5th International Conference on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices (Hawaii) で招待講演 (2005年)、「応用物理」“最近の展望”欄にレビュー論文掲載 (2007年) などの形で発表された。

2. 研究の目的

以上を背景として、本研究では、これまでにわれわれが開発した量子ホール素子による走査型エレクトロメータを元に、ノイズイメージングの高空間分解能化を目指す。これが実現できれば、各周波数における電荷揺らぎの空間分布、つまり電荷揺らぎ空間分布の周波数分散特性の観測という、以前とは質的に異なる計測が可能になるため、揺らぎとそこに関係する物性の理解が格段に進むと期待できる。

本研究ではさらにシステム的应用として、量子ホール系における電荷揺らぎを探求することを目的にした。対象とする系は、通常の半導体界面 (GaAs/AlGaAs) 2次元系とグラフェン表面2次元系である。

3. 研究の方法

(1) イメージングの高分解能化

センサとなる量子ホール素子の表面に金属蒸着 (Ti/Au) で、ゲート電極を付ける。このゲート電極と金属コートされた AFM カンチレバーとを結合させる。検出原理のアイデアは、以下の通りである (将来展望として、Y. Kawano *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 252108 (2005) の一節に記述)。試料の電子系とカンチレバー先との静電結合を通じて電荷が誘起→カンチレバーの金属部内で電荷を保存するように、先端とは反対側に逆極性の電荷が誘起→ゲート電極にも静電結合により電荷が誘起→センサの抵抗が変化。従来の手法では、空間分解能が量子ホール素子の 2 次元電子系のサイズで決められていたが、今回の手法では、カンチレバーの先端サイズで決定される。

(2) 量子ホール系への応用

(センサとは別の) 量子ホール効果試料に対して、ノイズ分布の周波数依存性を測定する。あらゆる計測装置由来のノイズを極力除去するよう、電源ラインや電磁シールドに関して細心の注意を払う。

試料については、最初にコンベンショナルな半導体界面 2 次元電子系を用いる。ただし、この系では、2 次元電子系が表面から 100nm 下がった場所にあるため、空間分解能はそこで頭打ちになってしまう。そこで、高分解能測定に向けた次の段階として、表面に 2 次元系が存在するグラフェンを用いる。

4. 研究成果

以下の 3 点である。

- ① 金属コートカンチレバーを介在させることで、24nm の高空間分解能を達成した。
- ② ①を用いて半導体界面量子ホール系における電荷の局所的な過渡応答を明らかにした。エッジ状態、バルク状態それぞれに特徴的な時定数を観測することができた。
- ③ ①を用いて、グラフェンにおけるポテンシャル分布マッピングに成功した。周期的な空間揺らぎ構造を見出した。

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 2 件)

Y. Kawano

“Scanning Electrometer: Mapping of Electric Potential and Its Fluctuation”
Japanese Journal of Applied Physics (Review paper), accepted for publication. 査読有り

Y. Kawano and K. Ishibashi

“Scanning nanoelectrometer based on a two-dimensional electron gas transistor with a probe-integrated gate electrode”
Applied Physics Letters **96**, 142109-1-3 (2010). 査読有り

[学会発表] (計 1 件)

Y. Kawano (invited)

“Scanning electrometer based on quantum electronic devices: Mapping of electric potential and its fluctuation”
17th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (Izu, December 2009).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 電荷分布イメージング装置

発明者: 河野行雄 (90%)、石橋幸治 (10%)

権利者: 独立行政法人理化学研究所

種類:

番号: 2009-204383

出願年月日: 2009 年 9 月 4 日

国内外の別: 国内

[その他]

研究紹介ホームページアドレス

http://www.riken.go.jp/lab-www/adv_device/kawano/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 行雄 (Kawano Yukio)

独立行政法人理化学研究所・石橋極微デバイ

ス工学研究室・専任研究員

研究者番号：90334250