

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540316

研究課題名(和文)イメージファイバを用いた空間2次微分スピニング測定装置の開発

研究課題名(英文)Development of high-resolution spin imaging using imaging fiber optics

研究代表者

内田 和人(UCHIDA KAZUHITO)

東京大学・物性研究所・技術専門職員

研究者番号:20422438

研究成果の概要（和文）： 光学測定系とピエゾ駆動ステージを結合させ、差分法による光信号の試料位置依存性のみを検出する高分解能イメージング手法を開発した。この手法は数値演算による画像の鮮鋭化処理とは決定的に異なっており、イメージファイバ光学系や顕微鏡システムに適用したところ、炭素原子1層の膜であるグラフェンの反射イメージ等の観測で、大幅な分解能の向上を実現した。スピン情報のイメージングについては、装置開発は完了したものの、本格的な物性研究への応用は今後の課題となった。

研究成果の概要（英文）： We developed a new technique for high-resolution imaging. It can be achieved by taking several images of an object after shifting it by a distance equivalent to the resolution limit of the device in the x and y directions on the focal plane. Using a simple image processing by calculating differences among the images, a high-resolution image can be obtained. This method produces high-resolution images without imperfection caused by the optical aberration, non-uniform lighting and the photoresponse non-uniformity of sensors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：

科研費の分科・細目：物理学、物性I

キーワード：イメージング、センシング、磁気光学、スピン

1. 研究開始当初の背景

電子の電荷に加え、さらにスピンの自由度を利用した新たな電子デバイスの創造を目指す「スピントロニクス」の研究において、情報伝達の主役であるスピンやその流れであるスピン流の制御技術は、キーテクノロジーのひとつと言える。その際、重要な要素となるのが、スピン流、あるいは蓄積されたスピン（磁化）のイメージング技術である。スピン（磁化）検出には、従来、スピン偏極電子顕微鏡やスピン偏極トンネル顕微鏡、あるいは磁気力顕微鏡を用いる等の方法があ

るが、これらはナノメートルの高分解能を有する反面、操作が容易ではなく、試料の広い範囲の測定には極めて長い時間を要する。また最近、磁気光学カー効果を利用し、光学顕微鏡を用いてスピンホール効果による試料端でのスピン蓄積の観測がおこなわれている。しかしながら、この方法も、ミクロンオーダーの光スポットを試料表面で走査しなければならぬ点において、簡便とは言い難く、長い時間スケールにおける光学系（光源、検出器、レンズ系等）の安定性、均一性に問題があり、さらに、温度、磁場、電場等の多

重環境下での測定には大きな制約を伴うものである。そこで、既存の測定装置に導入しやすく、比較的簡便に分解能を向上させる新たなイメージング手法の確立を目指すべく、本課題の申請に至った。

2. 研究の目的

イメージングにおける重要なファクターのひとつが分解能であり、光学系の収差や迷光、受光素子の感度の不均一や熱擾乱など、様々な要因がノイズとなり、装置の分解能に影響を与えている。そこで、本研究では、試料ステージ部を結像面内で装置の分解能程度の微量、ピエゾ駆動することにより、対象となる試料の位置依存性のみを差分法的に抽出する高分解能イメージング手法の確立を主な目的とする。具体的には、以下の課題がある。

- (1) イメージファイバ光学系と、ピエゾ駆動ステージを用いた位置シフトによるイメージング装置の開発
- (2) 分解能の位置シフト量依存性の測定
- (3) 単層グラフェンの観察
- (4) 光学顕微鏡への本手法の適用

これらのうち、(2)(3)については、同時並行的に行った。

3. 研究の方法

イメージング装置は、CCDカメラ、イメージファイバ、対物レンズ等を含めた光学系と、3軸ピエゾ駆動ステージを、光学定盤と除振台で構成される光学台上に構築し、製作した。次に、ピエゾ駆動ステージを用いて、試料の位置を結像面内で縦・横・斜め等に微量変化させつつ、複数のCCD画像を取得した。そして、それら画像の差分を計算し、差分積算画像とする、あるいは原点での画像との和をとるなど、一連のプロセスをプログラムを自作し、実行した。最終年度では、市販の光学顕微鏡（オリンパス BX60）にピエゾ駆動ステージを結合させた測定システムの構築を行い、本手法の更なる有効性を検証した。観察対象として、主に炭素の単原子層であるグラフェン試料を用いた。

4. 研究成果

(1) 位置シフトによる高分解能イメージング手法の確立

本課題で提案するイメージファイバを用いた高分解能イメージング手法において、必要条件として、当初、イメージファイバのハニカム構造の規則性に同期するように、試料を結像面内でファイバ素線の直径分（数マイクロメートル）縦・横・斜めの6方向に移動させなければならないと考えていた。しか

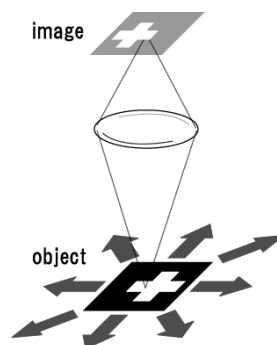


図1 試料の動きと像との関係

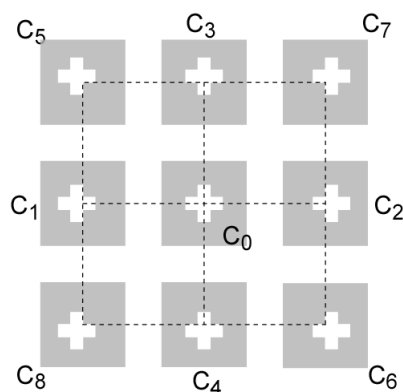


図2 8方向の場合の試料の相対的な動き

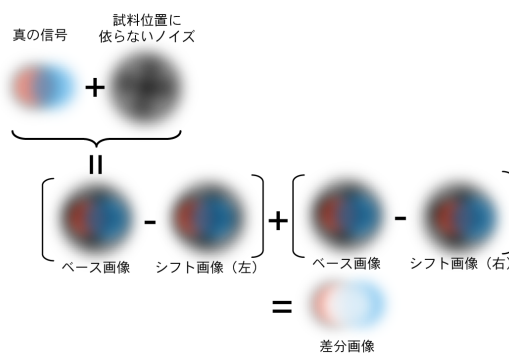


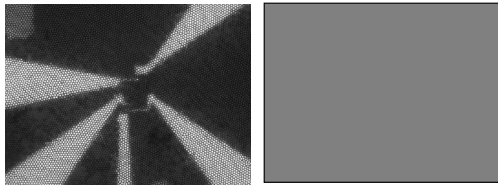
図3 1方向にシフトした場合の高分解能化の原理図

し、高品質の整列型イメージファイバの入手が難航し（製造が困難で、極めて高額となることが判明）、比較的品質の低いイメージファイバの購入を余儀なくされるなか、試行錯誤の過程で、個々のファイバ素線がプローブとなり、試料からの光信号を、位置を微量移動しながら探索することにより、差分信号（空間2次微分画像）が得られるとの着想に至った。これは、もはやイメージファイバすら必要とせず、通常の光学系において結像面内で試料を相対的に微量ずらせばいいと

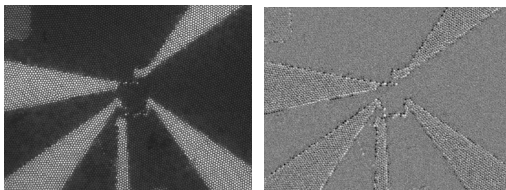
いうものであり、極めて汎用性の高い手法へ飛躍したと言える。図1に試料の動きと結像との関係、図2に8方向にシフトした場合の実際の試料の相対的な動きを示す。これら一連の動作により取得した複数画像の差分を取ることにより、光源、光学系、検出器の時間的・空間的揺らぎをほぼキャンセルしつつ、試料からの光信号の位置依存性のみを高感度に検出することが可能となる。(1方向にシフトした場合の原理図を図3に示す。)

このアイデアを実践すべく、とりあえず、当初の計画に沿ってイメージファイバ光学系、CCDカメラ、 piezo駆動ステージを結合させた画像検出装置を製作し(課題(1))、グラフェンホールパー試料を用いて、画像分解能のシフト量依存性を調べた(課題(2)と(3))。シフト方向は縦・横・斜めの8方

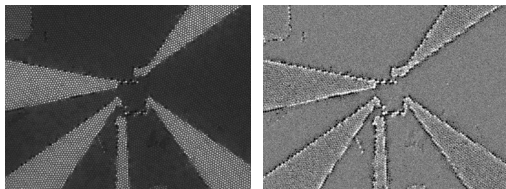
シフト量: 0 μm



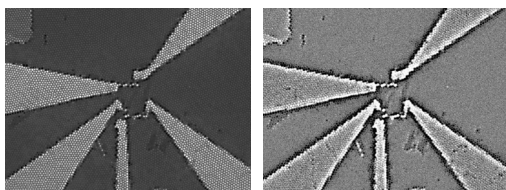
シフト量: 0.5 μm



シフト量: 1 μm



シフト量: 2 μm



シフト量: 4 μm

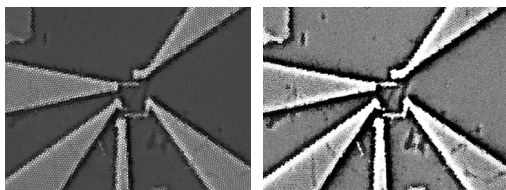
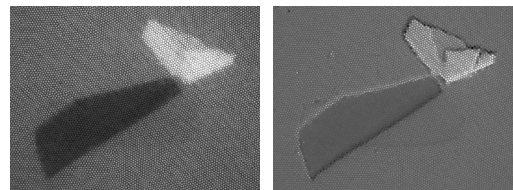


図4 取得画像のシフト量依存性
(右: 鮮鋭化画像、左: 差分積算画像)

向で、幾つかのシフト量について、ベース画像(原点での画像)とシフト画像との差分を積算した画像(差分積算画像)、さらに差分積算画像にベース画像を加算した画像(鮮鋭化画像)をそれぞれ示している(図4)。シフト量がゼロの場合、当然ながら差分積算画像もゼロ値となり、鮮鋭化画像は、通常の方法による取得画像となる。今回用いたイメージファイバのファイバ素線の直径は2-3マイクロメートルであり、この装置の空間分解能もその程度と見積もることが出来る。シフト量を次第に大きくしていくと、シフトに伴う光信号の差分、つまり試料の位置依存性が検出され、差分積算画像に試料の空間2次微分に相当する像が出現する。空間分解能の1/4-1/5程度である、0.5マイクロメートルにおいても、確認できるのは特筆すべきことである。さらにシフト量を大きくしていくと、装置の空間分解能程度である2マイクロメートル付近で両画像ともにもっともシャープとなり、さらに4マイクロメートルでは、分解能が低下する様子が観測された。これらのことから、高分解能イメージングに効果的なシフト量は、装置の分解能程度(1-1/5程度)であることが確かめられた。また、差分積算画像および鮮鋭化画像を見てわかるとおり、イメージファイバにおいて光が伝搬しないクラッド部のハニカム構造に対して、試料の像が極めて見やすくなっており、この装置のノイズとも言える成分が本手法により大きく低減している。さらに、最適なシフト量2マイクロメートルでの単層グラフェン試料の観察結果を図5に示す。ベース画像において白い部分は数十層、黒色は数層グラフェンであり、数層グラフェンの下方に単層グラフェンがあるが、明瞭には見えていない。しかし、本手法を用いることで、単層グラフェンおよび多層グラフェンの積層状態が明瞭に観察できた。ちなみにベース画像に画像

ベース画像

鮮鋭化画像



ラプラシアンフィルタ

差分積算画像

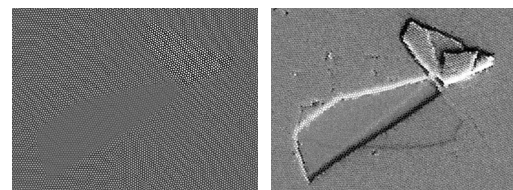


図5 イメージファイバシステムによる
単層グラフェンのイメージング

鮮鋭化処理であるラプラシアンフィルタをかけても、ファイバのハニカム構造が強調されるのみでグラフェンは全く見えない。

(2) 光学顕微鏡システムへの適用

本イメージング手法の有効性、汎用性をさらに検証すべく、市販の光学顕微鏡にピエゾ駆動ステージを結合させた測定システムを構築し、本手法を実施した。具体的には、光学顕微鏡 (OLYMPUS BX60) の試料ステージ部にピエゾ駆動機構を導入し、対象としてグラフェンホールバー試料を用いた。結像面内で試料を元の位置から縦・横・斜めの 8 方向に 0.1 マイクロメートルシフトさせ、複数の画像 (縦・横・斜め等) を取得し、同様のイメージングプロセスを実行した (対物レンズの NA から求めた顕微鏡の分解能は 0.4 マイクロメートル)。図 6 にグラフェンホールバー試料のイメージングの結果とラプラシアンフィルタ処理の結果を示している。複数の電極バーを縦に貫いているのが単層あるいは数層のグラフェンである。鮮鋭化画像ではグラフェンの積層状態や電極表面の状態がより鮮明に観察できるなど、明らかに分解能が向上している。また、ラプラシアンフィルタ処理では、単層グラフェンの明瞭さが低下している。

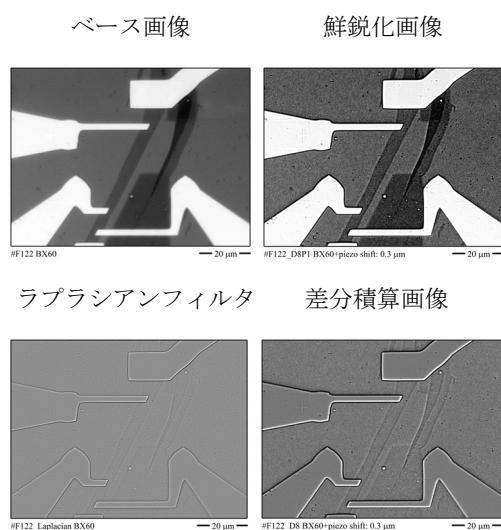


図 6 光学顕微鏡システムによるグラフェンホールバーのイメージング

まとめると、イメージファイバを用いたイメージング装置では、本来ファイバのコア径で決まる空間分解能しかなく、さらに光が伝播しないクラッド部のハニカム構造により、ラプラシアンフィルタ等の画像の鮮鋭化処理は有効ではない。本手法の適用、すなわち元の位置での画像とシフト画像との差分積算により、微弱なグラフェン試料による反射信号の検出に成功し、大幅な分解能の向上を確認した。また、分解能のシフト量依存性を調べ、有効なシフト量の範囲を明らかにした。

光学顕微鏡システムへの適用においては、結像面内でグラフェン試料を顕微鏡の空間分解能の 1/4 程度シフトさせ、同様の処理を行ったところ、明らかな分解能の向上を確認できた。これらの結果は数値演算による鮮鋭化処理とは決定的に異なっており、本イメージング手法が画像演算の過程で空間 2 次微分画像を自動生成することに加え、基本的に差分法であることから分解能の向上に有効であることが結論づけられた。本手法の汎用性は高く、画像センシング分野での幅広い応用が期待される。また、磁気カー効果を利用したスピン (磁化) 情報の検出については、偏光フィルタ等を追加した装置の開発は完了しており、物性評価、研究への応用が今後の課題として残された。

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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 内田和人、長田俊人、位置シフトによる高分解能イメージング手法の開発、日本応用物理学会、2012. 3. 17、早稲田大学
- ② 内田和人、長田俊人、ピエゾ駆動ステージを用いた空間 2 次微分スピンイメージング測定装置の開発、日本応用物理学会、2011. 8. 31、山形大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 位置シフトによる空間 2 次微分イメージング測定装置

発明者: 内田 和人、長田 俊人

権利者: 東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-258337

出願年月日: 23 年 11 月 11 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://osada.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 和人 (UCHIDA KAZUHITO)

東京大学・物性研究所・技術専門職員

研究者番号: 20422438

(2) 研究分担者

長田 俊人 (OSADA TOSHIHITO)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号: 00192526